

CLÁUDIA CONSTANTINA SALTARELLI SARAIVA

**INTEGRAÇÃO DE IMAGENS DE ALTA RESOLUÇÃO, IKONOS
E FOTOGRAFIA AÉREA POR MEIO DA MONORRESTITUIÇÃO
DIGITAL PARA A ATUALIZAÇÃO CARTOGRÁFICA
DE MAPAS MUNICIPAIS NA ESCALA DE 1:25 000**

Tese apresentada como requisito parcial
para a obtenção do grau de Doutor,
Curso de Pós-Graduação em Ciências
Geodésicas da Universidade Federal do
Paraná.

Orientadores:
Prof. Dr. Edson Aparecido Mitishita e
Prof. Dr. Jorge Silva Centeno

CURITIBA

2003


**“INTEGRAÇÃO DE IMAGENS DE ALTA RESOLUÇÃO,
IKONOS E FOTOGRAFIA AÉREA POR MEIO DA
MONORESTITUIÇÃO DIGITAL PARA A ATUALIZAÇÃO
CARTOGRÁFICA DE MAPAS MUNICIPAIS
NA ESCALA DE 1:25000 “**

POR

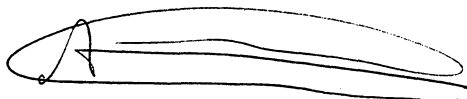
CLAUDIA CONSTANTINA SALTARELLI SARAIVA

Tese nº 028 aprovada como requisito parcial do grau de Doutor no
Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade
Federal do Paraná, pela Comissão formada pelos professores:

Curitiba, 30 de maio de 2003.



Prof. Dr. Edson Aparecido Mitschke - Orientador e Presidente (UFPR)



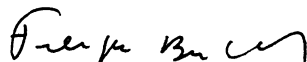
Prof. Dr. Aluir Porfirio Dal Poz – Membro (UNESP)



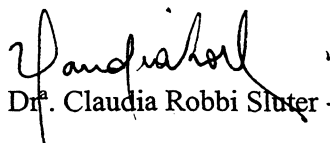
Prof. Dr. Jorge Pimentel Cintra - Membro (USP)



Prof. Dr. Everton Passos - Membro (UFPR)



Prof. Dr. Alzir Felipe Buffara Antunes – Membro (UFPR)



Prof. Dr. Claudia Robbi Sluter - Membro (UFPR)

**Dedico ao meu marido Mauro Roberto e
aos meus filhos Márluz, Marlise e Marlon**

AGRADECIMENTOS

Ao Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná mediante a linha de pesquisa em Fotogrametria, subárea Sensoriamento Remoto.

Orientação dos:

Prof. Dr. Edson Aparecido Mitishita e

Prof. Dr. Jorge Silva Centeno

Ao Instituto de Geociências Aplicadas, IGA/MG, que permitiu pesquisar a documentação resultante dos trabalhos elaborados para os municípios na área de cartografia digital que estejam em andamento ou sob trabalhos de atualização.

À Fundação de Amparo a Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG) pela ajuda financeira através da bolsa de estudo para doutorado.

À Prefeitura Municipal de Betim pelos empréstimos da imagem IKONOS e informações referentes aos pontos de apoio e dados altimétricos.

À Empresa Embrafoto S.A., empresa de aerolevantamentos, que forneceu os diapositivos da região de estudo.

À Empresa Aeroimagem Aerolevantamentos S.A. empresa de aerolevantamentos que digitalizou matricialmente os diapositivos.

Meus agradecimentos ao meu marido, meus filhos, colegas do IGA, do curso de pós-graduação e amigos, em especial a Sérgio Roberto Gouveia, Léa das Graças Camargos Anastesiou, Aliane Mota Baeta, Lincoln Diniz Carvalho, Clésio Araújo, Evilázio da Mota Leal, Eduardo Barreto Ribas, Maria Elizateth Leite Quintão Torres, Moises Ferreira Costa, Selma Regina Aranha Ribeiro - que sempre estiveram presentes e de alguma forma me ajudaram a concluir este trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	IX
LISTA DE TABELAS	XI
LISTA DE TABELAS	XI
RESUMO	XIII
ABSTRACT	XV
1.0 INTRODUÇÃO	1
1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS	1
1.2 OBJETIVOS.....	3
1.2.1 Objetivo geral.....	3
1.2.2 Objetivos específicos.....	3
1.3 JUSTIFICATIVAS	4
1.4 CONTRIBUIÇÃO DA TESE	6
1.5 APRESENTAÇÃO DO TRABALHO	6
2.0 REVISÃO DE LITERATURA.....	8
2.1 ATUALIZAÇÃO CARTOGRÁFICA.....	8
2.2 CARACTERÍSTICAS DOS MAPAS MUNICIPAIS	12
2.3 REAMBULAÇÃO DE MAPAS MUNICIPAIS.....	14
2.4 SENSORIAMENTO REMOTO	15
2.4.1 Introdução.....	15
2.4.2 Características Espectrais dos Alvos.....	18
2.4.3 Distorções geométricas das imagens de satélite.....	20
2.4.3.1 Distorção devido à rotação da Terra durante o tempo de aquisição da imagem.....	21
2.4.3.2 Distorção panorâmica	22
2.4.3.3 Distorção devido às variações na altitude da plataforma.....	23
2.4.3.4 Distorção provocada pela variação da velocidade da plataforma	23
2.4.3.5 Distorção provocada pela variação da atitude do satélite.....	24
2.4.3.6 Distorção provocada pela curvatura da Terra	25
2.5 CARACTERÍSTICAS ESPECTRAIS, RADIOMÉTRICAS, GEOMÉTRICAS E TEMPORAIS DA IMAGEM IKONOS.....	25
2.6 MONORRESTITUIÇÃO DIGITAL.....	28

2.6.1 Orientação interior analítica	30
2.6.2 Orientação Exterior de uma aerofoto no espaço	33
2.6.3 Modelo matemático fundamental da monorrestituição	37
2.6.4 Sistema Monorestituidor Digital	38
2.7 PONTOS DE APOIO PARA AEROFOTOS SINGULARES E IMAGENS DE SATÉLITE	40
2.8 MODELO DIGITAL DE TERRENO	41
2.8.1 Entrada de Dados	42
2.8.2. Geração dos Modelos Digitais de Terreno	45
2.8.2.1 Estrutura dos dados para um DTM	46
2.8.2.2 Interpolação	47
2.9 MODELOS MATEMÁTICOS DE CORREÇÕES GEOMÉTRICAS DE IMAGENS DIGITAIS	49
2.9.1 Transformação projetiva no plano	49
2.9.2 Transformação Afim no Plano	50
2.9.3 Transformação Linear Direta (DLT)	51
2.9.4 Modelo de Projeção Afim Paralela (APM) ou Projeção Paralela	54
3.0 MATERIAIS E MÉTODOS	58
3.1 MATERIAIS EMPREGADOS	58
3.1.1 Área de Estudo	58
3.1.2 Características das bases cartográficas	60
3.1.3 Características geométricas da câmara	61
3.1.4 Informações geométricas e radiométrica da imagem IKONOS do município de Betim	64
3.1.5 Equipamentos, Microcomputador e periféricos	65
3.1.6 Programas	65
3.1.7 Preparação dos materiais	66
3.1.7.1 Informação altimétrica	66
3.1.7.2 Imagens IKONOS	68
3.1.7.3 Aerofotos	68
3.2 METODOLOGIA	69
3.2.1 Avaliação da qualidade do mapa municipal digital 1:25000, carta digital 1:2000 e imagem IKONOS GEO	71
3.2.2 Obtenção do Apoio Fotogramétrico	75
3.2.3 Detecção e monorrestituição dos elementos de atualização da foto	78
3.2.3.1 Transformação do mapa digital no referencial de projeção UTM para o referencial da foto	79
3.2.3.2 Detecção e restituição dos elementos de atualização da aerofoto	80
3.2.4 Detecção e restituição das feições cartográficas complementares na imagem IKONOS	82

3.2.4.1 Transformação do mapa de feições cartográficas atualizadas para o referencial da imagem de satélite.....	83
3.2.4.2 Restituição complementar das feições cartográficas inexistentes no mapa e na foto constantes na imagem IKONOS	83
3.2.5 Eliminação das informações de referência	84
3.2.6 Retificação dos arquivos vetoriais das novas feições.....	85
3.2.6.1 Retificação das informações vetoriais do arquivo proveniente da foto empregando a técnica de monorrestituição	86
3.2.6.1.1 Orientação interior da foto	86
3.2.6.1.2 Orientação aproximada	87
3.2.6.1.3 Orientação exterior da aerofoto	87
3.2.6.1.4 Varredura externa.....	88
3.2.6.1.5 Retificação do arquivo vetorial.....	89
3.2.6.2 Retificação do arquivo vetorial da imagem de satélite.....	90
3.2.6.2.1 Transformação Projetiva no plano.....	91
3.2.6.2.2 Transformação Afim no Plano	92
3.2.6.2.3 Transformação DLT.....	92
3.2.6.2.4 Transformação Afim Paralela – APM.....	93
3.2.7 Integração das novas informações retificadas ao mapa municipal.....	94
3.2.9 Reambulação.....	95
3.2.10 Edição dos elementos cartográficos	96
4.0 RESULTADOS E DISCUSSÕES	97
4.1 AVALIAÇÃO DO MATERIAL EMPREGADO NA ATUALIZAÇÃO CARTOGRÁFICA - MAPA MUNICIPAL ORIGINAL NA ESCALA 1:25000, BASE CARTOGRÁFICA NA ESCALA DE 1:2000, IMAGEM IKONOS PADRÃO GEO	97
4.1.1 Avaliação da carta digital 1:25000.....	99
4.1.1.1 Avaliação das informações planimétricas.....	100
4.1.1.2 Avaliação das informações altimétricas	105
4.1.2 Avaliação da carta digital na escala 1:2000.....	109
4.1.3 Avaliação da imagem IKONOS GEO.....	110
4.2 ATUALIZAÇÃO CARTOGRÁFICA COM O EMPREGO DA AEROFOTO	112
4.2.1 Orientação interior da foto	114
4.2.2 Orientação aproximada da foto.....	115
4.2.3 Orientação exterior da foto	116
4.2.4 Verificação da metodologia de atualização cartográfica de mapas municipais com a técnica de monorrestituição de aerofotos na escala de 1:30000 nos pontos de verificação aleatórios.....	117
4.2.5 Verificação da metodologia de atualização cartográfica de mapas municipais, em diversas entidades gráficas, com a técnica de monorrestituição de aerofotos na escala 1:30000.....	124

4.3 VERIFICAÇÃO DA RETIFICAÇÃO DA ATUALIZAÇÃO	
CARTOGRÁFICA COM A IMAGEM IKONOS.....	127
4.3.1 Verificação da metodologia de atualização cartográfica de mapas municipais, com a técnica de monorrestituição de imagem de satélite - IKONOS - empregando a transformação projetiva no plano	129
4.3.2 Verificação da metodologia de atualização cartográfica de mapas municipais, com a técnica de monorrestituição de imagem de satélite - IKONOS - empregando-se a transformação afim no plano	131
4.3.3 Verificação da metodologia de atualização cartográfica de mapas municipais, com a técnica de monorrestituição de imagem de satélite - IKONOS - empregando a transformação DLT.....	133
4.3.3.1 Verificação da aplicação de 9 e 18 pontos de apoio no ajustamento com a técnica dos mínimos quadrados e transformação DLT na imagem IKONOS	134
4.3.3.2 Análise das discrepâncias nos pontos de verificação aleatórios provenientes da monorrestituição com a aplicação da transformação DLT ...	142
4.3.3.3 Análise das discrepâncias nos pontos definidores das feições cartográficas do mapa de atualização monorestituídas da imagem IKONOS e modelo DLT	154
4.3.4 Verificação da metodologia de atualização cartográfica de mapas municipais, com a técnica de monorrestituição de imagem de satélite - IKONOS - empregando a transformação APM.....	157
4.3.4.1 Verificação da aplicação de 9 e 18 pontos de apoio no ajustamento com a técnica dos mínimos quadrados e transformação APM na monorrestituição da imagem IKONOS	158
4.3.4.2 Análise das discrepâncias nos pontos de verificação aleatórios provenientes da monorrestituição com a aplicação da transformação APM ..	162
4.3.4.3 Análise das discrepâncias nos pontos definidores das feições cartográficas do mapa de atualização monorestituídas da imagem IKONOS com o modelo APM	173
4.3.5 Análise da metodologia de atualização cartográfica.....	176
 5.0 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	183
 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	187
APÊNDICE I - MINUTA DE ATUALIZAÇÃO DA FOTO	195
APÊNDICE II - MINUTA DE ATUALIZAÇÃO DA IMAGEM.....	197
APÊNDICE III - MAPA MUNICIPAL ATUALIZADO.....	199
ANEXO I - MAPA MUNICIPAL DA ÁREA DE ESTUDO NA ESCALA 1:25000 MUNICÍPIO DE BETIM	201
ANEXO II - MANUAL DE CONVENÇÕES CARTOGRÁFICAS PARA MAPAS MUNICIPAIS - IGA	203

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - CURVAS ESPECTRAIS DAS ÁREAS URBANAS	19
FIGURA 2 - EFEITO DA ROTAÇÃO DA TERRA NO TEMPO DE AQUISIÇÃO DA IMAGEM. (A) IMAGEM ORGANIZADA EM UMA GRADE (B) RECUO DE LINHAS SUCESSIVAS PARA OESTE, DEVIDO AO MOVIMENTO DE ROTAÇÃO DA TERRA DURANTE AO TEMPO DE AQUISIÇÃO DA IMAGEM.....	21
FIGURA 3 - DISTORÇÃO PANORÂMICA.....	22
FIGURA 4 - DISTORÇÃO DEVIDO À ALTITUDE	23
FIGURA 5 - DISTORÇÃO PROVOCADA PELA MUDANÇA DE VELOCIDADE DA PLATAFORMA.....	24
FIGURA 6 - DESLOCAMENTOS PROVOCADOS PELAS VARIAÇÕES DA ATTITUDE DO SATÉLITE.....	24
FIGURA 7 - SISTEMA DE MONORRESTITUIÇÃO DIGITAL.....	29
FIGURA 8 - REFERENCIAL FIDUCIAL DE UMA AEROFOTO COM 4 MARCAS FIDUCIAIS.....	32
FIGURA 9 - REFERENCIAL FOTOGRAFÉTRICO	33
FIGURA 10 - DETERMINAÇÃO DA COORDENADA EXATA DO PONTO NO REFERENCIAL DO TERRENO PELO PROCESSO DE ITERAÇÃO.....	42
FIGURA 11 - MAPA DE LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO DO MUNICÍPIO DE BETIM - MG.....	59
FIGURA 12 - DELIMITAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	60
FIGURA 13 - DISPOSIÇÃO DAS MARCAS FIDÚCIAS DA CÂMARA WILD RC10	62
FIGURA 14 - ETAPAS EXECUTADAS NO PREPARO DOS MATERIAIS.....	66
FIGURA 15 - METODOLOGIA DE ATUALIZAÇÃO CARTOGRÁFICA.....	70
FIGURA 16 - DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO.....	75
FIGURA 17 - DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS DE APOIO DA CARTA 1:2000.....	78
FIGURA 18 - GRÁFICO Q.Q PLOT DAS DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICAS DO MAPA DIGITAL.....	102
FIGURA 19 - GRÁFICO Q.Q PLOT DAS DISCREPÂNCIAS ALTIMÉTRICAS DO MAPA DIGITAL.....	106
FIGURA 20 - TENDÊNCIA DOS RESÍDUOS PLANIMÉTRICOS DA IMAGEM IKONOS GEO.....	112
FIGURA 21 - DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO ALEATÓRIOS E AS CLASSES DE QUALIDADE PARA MAPAS NA ESCALA DE 1:25000.....	119
FIGURA 22 - DISTRIBUIÇÃO DAS DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO ALEATÓRIOS NAS CLASSES DE QUALIDADE.....	124
FIGURA 23 - VALORES ESTATÍSTICOS DAS FEIÇÕES CARTOGRÁFICAS SEGUNDO SUAS CARACTERÍSTICAS GRÁFICAS.....	126
FIGURA 24 - RESÍDUOS DAS OBSERVAÇÕES NA TRANSFORMAÇÃO PROJETIVA NO PLANO.....	131
FIGURA 25 - RESÍDUOS DAS OBSERVAÇÕES NA TRANSFORMAÇÃO AFIM NO PLANO	133
FIGURA 26 - RESÍDUOS DAS OBSERVAÇÕES NA TRANSFORMAÇÃO DLT	137
FIGURA 27 - DISTRIBUIÇÃO DOS 18 PONTOS DE APOIO NA ÁREA DE ESTUDO	138
FIGURA 28 - RESÍDUOS DOS PONTOS DE APOIO NA TRANSFORMAÇÃO DLT	141
FIGURA 29 - VALORES ESTATÍSTICOS RESULTANTES DO MODELAMENTO COM 9 E 18 PONTOS E TRANSFORMAÇÃO DLT.....	142
FIGURA 30 - DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO ALEATÓRIOS.....	143
FIGURA 31 - DISCREPÂNCIAS DAS COORDENADAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO ALEATÓRIOS DO MAPA DE ATUALIZAÇÃO	145

FIGURA 32 - DISCREPÂNCIAS DAS COORDENADAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO ALEATÓRIOS DO MAPA DE ATUALIZAÇÃO	149
FIGURA 33 - DISCREPÂNCIAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO ALEATÓRIOS	150
FIGURA 34 - DISCREPÂNCIAS DAS COORDENADAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO ALEATÓRIOS DO MAPA DE ATUALIZAÇÃO	153
FIGURA 35 - DISCREPÂNCIAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO ALEATÓRIOS RETIFICADOS COM EQUIDISTÂNCIA DE 1 E 10 METROS E MODELO DE TRANSFORMAÇÃO DLT	154
FIGURA 36 - VALORES ESTATÍSTICOS DE MÉDIA E DESVIO PADRÃO DAS FEIÇÕES CARTOGRÁFICAS RETIFICADAS COM A TRANSFORMAÇÃO DLT	155
FIGURA 37 - RESÍDUOS DAS OBSERVAÇÕES NA TRANSFORMAÇÃO APM	160
FIGURA 38 - VALORES ESTATÍSTICOS RESULTANTES DO MODELAMENTO COM 9 E 18 PONTOS E TRANSFORMAÇÃO APM	161
FIGURA 39 - DISCREPÂNCIAS DAS COORDENADAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO ALEATÓRIOS DO MAPA DE ATUALIZAÇÃO RETIFICADO COM A TRANSFORMAÇÃO APM	163
FIGURA 40 - DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO ALEATÓRIOS DO MAPA DE ATUALIZAÇÃO RETIFICADO COM A TRANSFORMAÇÃO APM	168
FIGURA 41 - DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO ALEATÓRIOS	169
FIGURA 42 - DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO ALEATÓRIOS - TRANSFORMAÇÃO APM	172
FIGURA 43 - DISCREPÂNCIAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO ALEATÓRIOS RETIFICADOS COM EQUIDISTÂNCIA DE 1 E 10 METROS E MODELO DE TRANSFORMAÇÃO APM	173
FIGURA 44 - VALORES ESTATÍSTICOS DE MÉDIA E DESVIO PADRÃO DAS FEIÇÕES CARTOGRÁFICAS RETIFICADAS COM A TRANSFORMAÇÃO APM	175
FIGURA 45 - VALORES ESTATÍSTICOS DE MÉDIA E DESVIO PADRÃO DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO ALEATÓRIOS	180
FIGURA 46 - VALORES DOS DESVIO PADRÃO DAS FEIÇÕES CARTOGRÁFICAS NOS MODELOS MATEMÁTICOS DE RETIFICAÇÃO DA IMAGEM DLT E APM E AEROFOTO	181
FIGURA 47 - VALORES DAS MÉDIAS DAS FEIÇÕES CARTOGRÁFICAS NOS MODELOS MATEMÁTICOS DE RETIFICAÇÃO DA IMAGEM DLT E APM E AEROFOTO	181
FIGURA 48 - IMAGEM GERADAS COM AS GRADES ALTIMÉTRICAS PROVENIENTES DE CURVAS DE NÍVEL COM EQUIDISTÂNCIA DE 1M E 10M	182

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: REGIÕES ESTUDADAS DO ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO EM SENSORIAMENTO REMOTO.....	16
TABELA 2 - PRECISÃO DAS IMAGENS IKONOS NOS SEUS VÁRIOS PADRÕES.....	28
TABELA 3 - COORDENADAS DA ÁREA DE ESTUDO.....	58
TABELA 4 - COORDENADAS DA ÁREA DO MAPA DIGITAL DO MUNICÍPIO DE BETIM.....	61
TABELA 5 - VALORES DAS DISTORÇÕES RADIAIS SIMÉTRICAS EM FUNÇÃO DAS POSIÇÕES DA CÂMARA.....	63
TABELA 6 - COORDENADAS APROXIMADAS DA ÁREA DA FOTOGRAFIA NA ESCALA DE 1:30000.....	64
TABELA 7 - COORDENADAS APROXIMADAS DA ÁREA DA IMAGEM IKONOS.....	65
TABELA 8 - PEC E ERRO PADRÃO ADMISSÍVEL NAS DIVERSAS CLASSES PARA A CARTA NA ESCALA DE 1:25000.....	72
TABELA 9 - PERCENT POINTS OF THE NORMAL PROBABILITY PLOT CORRELATION COEFFICIENT R.....	72
TABELA 10 - ORGANIZAÇÃO DAS INFORMAÇÕES DE ATUALIZAÇÃO EM NÍVEIS.....	81
TABELA 11 - ORGANIZAÇÃO DAS INFORMAÇÕES DE ATUALIZAÇÃO EM NÍVEIS DE INFORMAÇÃO INTEGRANDO ELEMENTOS DA IMAGEM E DA FOTO.....	84
TABELA 12 - COMPARAÇÃO ENTRE OS PONTOS DA CARTA NA ESCALA DE 1:2000 E 1:25000.....	98
TABELA 13 - DISCREPÂNCIA ALTIMÉTRICA ENTRE AS BASES CARTOGRÁFICAS NA ESCALA DE 1:2000 E 1:25000.....	99
TABELA 14 - DISCREPÂNCIA PLANIMÉTRICA ENTRE OS PONTOS DE VERIFICAÇÃO NO MAPA DIGITAL (1:25000) E SEUS HOMÓLOGOS NO CAMPO.....	100
TABELA 15 - DISCREPÂNCIA PLANIMÉTRICA ENTRE OS PONTOS DO MAPA DIGITAL E OS DE VERIFICAÇÃO DO CAMPO COM ELIMINAÇÃO DO ERRO GROSSEIRO.....	101
TABELA 16 - DISCREPÂNCIAS ALTIMÉTRICAS DOS PONTOS DA CARTA DIGITAL COM OS PONTOS DE VERIFICAÇÃO DE CAMPO.....	106
TABELA 17 - DISCREPÂNCIAS ENCONTRADAS NA IMAGEM IKONOS GEO COM RELAÇÃO À CARTA 1:2000.....	111
TABELA 18 - RESÍDUOS OBSERVADOS NA ORIENTAÇÃO INTERIOR DA AEROFOTO.....	115
TABELA 19 - RESÍDUOS PRESENTES NA ORIENTAÇÃO APROXIMADA DA AEROFOTO.....	116
TABELA 20 - RESÍDUOS DAS OBSERVAÇÕES NO CÁLCULO DOS PARÂMETROS DA ORIENTAÇÃO EXTERIOR.....	117
TABELA 21 - DISCREPÂNCIAS NOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO DE ALEATÓRIO MONORESTITUÍDOS DE AEROFOTOS NA ESCALA DE 1:30000.....	118
TABELA 22 - DISCREPÂNCIAS NOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO ALEATÓRIOS MONORESTITUÍDOS DE AEROFOTOS NA ESCALA DE 1:30000.....	121
TABELA 23 - RESUMO DO RESULTADO ESTATÍSTICO DE DIFERENTES FEIÇÕES DO MAPA DE ATUALIZAÇÃO CARTOGRÁFICA PROVENIENTE DA MONORRESTITUIÇÃO DA AEROFOTO.....	125
TABELA 24 - OBSERVAÇÕES DE PONTOS FOTOIDENTIFICÁVEIS COM FATORES DE AMPLIAÇÃO DE 10 E 15 VEZES.....	128
TABELA 25 - RESÍDUOS DAS OBSERVAÇÕES NO REFERENCIAL DO TERRENO EMPREGANDO O MODELO DE TRANSFORMAÇÃO PROJETIVA NO PLANO.....	129

TABELA 26 - VALORES DOS PARÂMETROS DA TRANSFORMAÇÃO PROJETIVA E SEUS DESVIOS PADRÃO	130
TABELA 27 - RESÍDUOS DAS OBSERVAÇÕES NO REFERENCIAL DO TERRENO EMPREGANDO O MODELO DE TRANSFORMAÇÃO AFIM NO PLANO	132
TABELA 28 - VALORES DOS PARÂMETROS DA TRANSFORMAÇÃO AFIM E SEU DESVIO PADRÃO	132
TABELA 29 - RESÍDUOS DAS OBSERVAÇÕES PRESENTES NA TRANSFORMAÇÃO DLT.....	135
TABELA 30 - VALORES DOS PARÂMETROS DA TRANSFORMAÇÃO DLT COM 9 PONTOS DE MODELAGEM E SEUS DESVIOS PADRÃO.....	136
TABELA 31 - VALORES DOS PARÂMETROS DA ORIENTAÇÃO EXTERIOR CALCULADOS PELA TRANSFORMAÇÃO DLT COM 9 PONTOS DE MODELAGEM.....	136
TABELA 32 - RESÍDUOS DAS OBSERVAÇÕES PRESENTES NA TRANSFORMAÇÃO DLT NO REFERENCIAL DO TERRENO.....	139
TABELA 33 - VALORES DOS PARÂMETROS DA TRANSFORMAÇÃO DLT E SEUS DESVIOS PADRÃO	139
TABELA 34 - VALORES DOS PARÂMETROS DA ORIENTAÇÃO EXTERIOR CALCULADOS PELA TRANSFORMAÇÃO DLT.....	140
TABELA 35 - DISCREPÂNCIAS DAS COORDENADAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO ALEATÓRIOS DO MAPA DE ATUALIZAÇÃO	144
TABELA 36 - DISCREPÂNCIAS DAS COORDENADAS DOS PONTOS ALEATÓRIOS DO MAPA DE ATUALIZAÇÃO	147
TABELA 37 - DISCREPÂNCIAS DAS COORDENADAS DOS PONTOS ALEATÓRIOS DO MAPA DE ATUALIZAÇÃO	150
TABELA 38 - RESUMO DO RESULTADO ESTATÍSTICO DE DIFERENTES FEIÇÕES CARTOGRÁFICAS DO MAPA DE ATUALIZAÇÃO CARTOGRÁFICA RETIFICADO COM A TRANSFORMAÇÃO DLT.....	155
TABELA 39 - RESÍDUOS DAS OBSERVAÇÕES, NO REFERENCIAL DO TERRENO, DO MODELO DE APM.....	158
TABELA 40 - VALORES DOS PARÂMETROS DA TRANSFORMAÇÃO APM - E SEUS DESVIOS PADRÃO	159
TABELA 41 - RESÍDUOS DAS OBSERVAÇÕES DO MODELO DE TRANSFORMAÇÃO APM.....	160
TABELA 42 - PARÂMETROS DA TRANSFORMAÇÃO APM COM 18 PONTOS DE MODELAGEM.....	161
TABELA 43 - DISCREPÂNCIAS DAS COORDENADAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO ALEATÓRIOS DO MAPA DE ATUALIZAÇÃO - TRANSFORMAÇÃO APM.....	163
TABELA 44 - RESÍDUOS DAS COORDENADAS DOS PONTOS ALEATÓRIOS DO MAPA DE ATUALIZAÇÃO RETIFICADO COM A TRANSFORMAÇÃO APM.....	166
TABELA 45 - DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICAS DAS COORDENADAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO ALEATÓRIOS - TRANSFORMAÇÃO APM.....	170
TABELA 46 - RESUMO DO RESULTADO ESTATÍSTICO DE DIFERENTES FEIÇÕES DO MAPA DE ATUALIZAÇÃO CARTOGRÁFICA RETIFICADO COM A TRANSFORMAÇÃO APM.....	174

RESUMO

Desenvolveu-se nesta pesquisa uma metodologia para a atualização cartográfica de mapas municipais, construídos na forma digital, na escala de 1:25000, integrando imagens de satélite de alta resolução, fotografias aéreas na escala de 1:30000 e a técnica de monorrestituição digital.

Para sua realização foram utilizados como materiais: um microcomputador, um programa de CAD – *Microstation* – um gerenciador de imagem – *Descartes* – um programa de geração de DTM – *Surfer* – e um programa de retificação de informações vetoriais – Sistema de Monorrestituição Digital, uma aerofoto na escala de 1:30000, uma imagem IKONOS e dois mapas digitais da área de estudo que serviram como fontes de dados planialtimétricos.

A metodologia de atualização cartográfica foi dividida nas etapas de avaliação das fontes de informações cartográficas disponíveis, obtenção do apoio, detecção das feições cartográficas e restituição da aerofoto, detecção das feições cartográficas e restituição da imagem IKONOS, eliminação das feições de referência, monorrestituição das feições cartográficas atualizadas (aerofoto e imagem), integração das novas feições ao mapa, reambulação e edição final dos elementos.

A avaliação revelou que, a parte planimétrica do mapa na escala de 1:25000, não possuía qualidade suficiente para servir fonte de informação de coordenadas planimétricas de pontos de apoio. No entanto, as informações altimétricas do mesmo, na escala de 1:25000, foram classificadas como padrão A e, portanto, serviram como fonte de dados altimétricos. As informações planimétricas do mapa 1:25000 foram utilizadas como referência das feições cartográficas existentes na época (1977) e as coordenadas dos pontos de apoio foram adquiridas na carta na escala de 1:2000.

Para o desenvolvimento desta metodologia foram empregados e testados vários modelos matemáticos (transformação projetiva, afim, afim paralela e linear direta)

buscando corrigir as deformações geométricas da imagem de maneira a se obter uma atualização que mantivesse a qualidade do mapa original – Classe A.

Analizou-se o comportamento dos resíduos nos pontos de apoio empregados no ajustamento por mínimos quadrados e método paramétrico com injunção de posição, com os modelos empregados. Analisou-se também, o comportamento das discrepâncias das feições cartográficas e dos pontos de verificação aleatórios retirados dos mapas de atualização retificados com os modelos de transformação afim paralela (APM) e transformação linear direta (DLT), ajustados por mínimos quadrados e método paramétrico com injunção de posição com 9 e 18 pontos de apoio, e fontes de informação altimétrica proveniente fontes já existentes mapa na escala 1:25000 - amostragem secundária com curvas de nível de 10m e proveniente de restituição fotogramétrica na escala 1:2000 - amostragem primária- com curvas de nível de 1m.

O modelo matemático que apresentou o melhor resultado foi o da transformação afim paralela e portanto foi o modelo empregado na metodologia de atualização.

ABSTRACT

This research developed a methodology for the municipal maps updating, built in the digital form, in the scale of 1:25000, integrating high resolution satellite images, aerial photos in the scale of 1:30000 and the technique of digital monoplottting.

It has been used for the accomplishment of this methodology: a microcomputer, a program of CAD - *Microstation* - an image manager - *Descartes* - a program of generation of DTM - *Surfer* - and a program of rectification of vectorial information - *System of Digital Monorrestituição*, an airphoto in the scale of 1:30000, an image IKONOS and two digital maps of the study area that were the source to the planimetric and altimetric data.

The methodology of map updating was divided in the stages of evaluation of the sources of available cartographic information, obtaining of the support, detection of the cartographic features and restitution of the airphotos, detection of the cartographic features and restitution of the image IKONOS, elimination of the reference features, monoplottting of the up-to-date cartographic features (aereal photos and image), integration of the new features to the map, surveys ground and the end edition of the elements.

The evaluation revealed that, the planimetric information of the map in the scale of 1:25000, didn't have enough quality to serve as data source to the information of coordinates planimetric of ground controls points. However, the altimetric data, in the scale of 1:25000, was classified as pattern A and, therefore, they could be used as source to the altimetric data. The planimetric information of the 1:25000 map used the existent cartographic features (1977) and the coordinates of the support points were acquired from the map in the scale of 1:2000.

For the development of this methodology several mathematical models were used and tested, trying to correct the geometric deformations of the image, in order to obtain a map updating that maintained the quality of the original map - Class A.

The models in use analysed the behavior of the residual on the grounds control points employed on the least squares adjustment and parametric method with injunction of position. It was also analyzed, the behavior of the discrepancies of the cartographic features and of the removed controls points checks of the maps updating rectified with the mathematical models: models projection affine - APM - and Transformation Linear Direct DLT- least square adjustment and parametric method with position injunction, with 9 and 18 grounds controls points, and sources of information from altimetric sources that already existed on the scale 1:25000 - secondary sampling - with contour line of 10m and of the airphotogrammetric restitution on the scale of 1:2000 - primary sampling - with contour line of 1m. The mathematical model that presented the best result was the models projection affine and consequently it was used in the map updating methodology.

1.0 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Este trabalho apresenta uma metodologia de atualização cartográfica para mapas municipais na escala de 1:25000, integrando fotos aéreas e imagens de satélite de alta resolução, IKONOS, por meio da monorrestituição digital de aerofotos e de imagens de satélite.

Os mapas municipais são construídos com o objetivo de atender à necessidade de uma base cartográfica, precisa e permanentemente atualizada, para os levantamentos estatísticos, sócios econômicos, estudos dos limites municipais, planejamento municipal e uma série de outras utilizações. Os mapas municipais foram considerados por SANTOS et al. (1999), como um produto cartográfico primordial no desempenho do papel de síntese territorial na divulgação dos resultados do Censo, sob a regência das ferramentas de geoprocessamento disponíveis.

Estes mapas municipais têm como base as cartas do mapeamento sistemático do Brasil em suas várias escalas (1:25000, 1:50000 e 1:100000, 1:250000) publicadas há 30 anos, aproximadamente. Para alcançar o objetivo de uma base atualizada, as instituições federais e estaduais vêm aplicando metodologias próprias de atualização cartográfica, conforme os recursos (dados e equipamentos) disponíveis.

Em Minas Gerais, Estado financiador desta pesquisa, os procedimentos de atualização são executados, ocasionalmente, pelo órgão responsável pela cartografia estadual, Instituto de Geociências Aplicadas – (IGA), em mapeamentos realizados para os municípios, de forma à atender uma demanda local.

A metodologia de atualização cartográfica aplicada pelo IGA, para mapas municipais, consiste na constatação direta de mudança do terreno, comparando o mapa existente com a situação real. Nesta operação, feições cartográficas são acrescidas ao mapa com GPS de navegação. Esta metodologia é utilizada para mapas na escala de

1:50000 e menores e, quando aplicada na escala de 1:25000, as novas feições aparecem com o rótulo de alinhamento aproximado devido à incerteza de sua localização exata. Desta forma, uma metodologia mais precisa é necessária para atender aos municípios em uma região onde as atividades humanas são mais intensas e cujo mapeamento sistemático se encontra na escala de 1:25000.

A desatualização das bases cartográficas traz dificuldades para todos aqueles que trabalham com atividades que dependem de mapas para a elaboração de estudos e anteprojetos para a região, pois segundo CARNASCIALI & BUENO (1996, p.952) “decisões baseadas em informações erradas ou desatualizadas conduzem a complicações pessoais ou sociais”. A atualização cartográfica dos mapas municipais vem ao encontro das necessidades de um governo local que, com poucos recursos orçamentários, precisa do seu subsídio para um melhor planejamento das suas ações.

Procurando suprir a necessidade dos municípios referente ao planejamento das ações do governo municipal sobre seu território, determinou-se o mapa municipal para estudo de caso, nesta pesquisa. Isto porque um mapa municipal só é executado quando solicitado pela autoridade local ou político da região, segundo a necessidade do município.

Levando-se em conta que o Estado de Minas Gerais possui 853 municípios (MINAS GERAIS, 1997), pode-se considerar que a dimensão da tarefa de se manter atualizada a representação cartográfica municipal, em suas várias escalas, é inesgotável, carecendo de grandes recursos financeiros e humanos. Buscando minimizar os custos, tempo de execução e aumentar a eficiência dos procedimentos de atualização, várias metodologias são utilizadas e aperfeiçoadas para isso, sendo essencial que as oportunidades fornecidas por novos equipamentos e tecnologias sejam exploradas. Desta forma, as recentes tecnologias nas áreas de sensoriamento remoto, geodésia e cartografia têm se tornado uma enorme fonte de pesquisa junto aos órgãos responsáveis pela cartografia, no sentido de se desenvolver uma metodologia mais eficiente para a atualização cartográfica.

O surgimento, no mercado, das imagens de alta resolução, IKONOS, em

setembro de 1999, veio aumentar o campo de exploração da pesquisa de atualização cartográfica, não só no que concerne aos modelos matemáticos de transformação empregados na correção de suas distorções, como, também, na área de aplicação destas imagens em mapeamentos que requerem maior precisão, por sua semelhança cada vez maior com as fotografias aéreas.

A periodicidade da coleta destas imagens digitais e sua semelhança com as aerofotos são fatores que contribuíram para a proposta de associação entre essas imagens orbitais com a fotografia aérea, de maneira a proporcionar resultado em um menor tempo e com maior precisão. Esta integração do processo fotogramétrico convencional e da nova tecnologia de imagens de satélite de alta resolução ocorrerá na forma digital por meio de uma tecnologia desenvolvida no País: a monorrestituição de aerofotos e imagens digitais.

1.2 OBJETIVOS

Os objetivos desta pesquisa foram divididos em: objetivo geral e objetivos específicos.

1.2.1 Objetivo geral

Investigar e desenvolver uma metodologia para atualização dos mapas municipais digitais, na escala de 1:25000, integrando imagem de alta resolução IKONOS e fotografias aéreas na escala de 1:30000, empregando a técnica de monorrestituição digital.

1.2.2 Objetivos específicos

- Avaliar as potencialidades da integração de imagens de satélite de alta resolução, IKONOS com aerofotos digitais com procedimentos de

monorrestituição digital, para a atualização cartográfica na escala de 1:25000;

- Avaliar a qualidade posicional das informações obtidas na imagem IKONOS;
- Verificar a capacidade do Sistema de Monorrestituição Digital para a realização da atualização cartográfica;
- Apresentar as precisões alcançadas, empregando diferentes transformações matemáticas na retificação do arquivo vetorial proveniente da imagem de satélite.

1.3 JUSTIFICATIVAS

Esta pesquisa nasceu de uma necessidade prática do Instituto de Geociências Aplicadas em desenvolver uma metodologia mais eficiente para os mapas de municípios próximos à região metropolitana de Belo Horizonte, cujo mapeamento sistemático se encontrava na escala média de 1:25000 e onde as alterações sobressaltavam aos olhos do reambulador em decorrência do trabalho de campo.

Em plena transformação de suas atividades cartográficas analógicas para as digitais, o IGA tem investido no aperfeiçoamento de seus profissionais de maneira que estes pesquisem soluções metodológicas alternativas aos programas e equipamentos estereofotogramétricos digitais e aerolevantamentos, de alto custo. Essas soluções alternativas também visam a contornar a necessidade de treinamento de novos operadores com acuidade visual para a restituição estereofotogramétrica, dentre outros obstáculos enfrentados pela instituição para desempenhar suas atividades cartográficas e de atualização.

Esta pesquisa, portanto, está direcionada à atender as necessidades desta Instituição responsável pela cartografia, de maneira a apresentar uma solução alternativa que minimize os custos e o problema da atualização, aumentando com eficiência a produção.

Tendo como meta a racionalização dos recursos financeiros e a procura por processos operacionais de restituição simplificados, este estudo direcionou-se para o aproveitamento de informações já existentes na instituição, as fotografias aéreas na escala de 1:30000, integrando-as às informações mais atuais de imagens IKONOS, por meio de uma tecnologia nacional de monorrestituição digital de aerofotos e imagens de alta resolução.

A tecnologia de monorrestituição digital foi escolhida para esta pesquisa porque ela não requer acuidade visual do operador – visão estereoscópica – permitindo que o próprio usuário realize ou atualize o mapeamento digital. Ela não só acompanha a tendência em direção a uma cartografia personalizada, como também minimiza o problema provocado pela carência de funcionários especializados, nas instituições de cartografia estaduais, que estão impossibilitadas de recompor o seu quadro funcional na mesma proporção em que ocorrem as aposentadorias.

A tendência da integração do Sensoriamento Remoto com a Fotogrametria se acentuou em 1999 com o lançamento do satélite IKONOSII e a comercialização de suas imagens digitais. Estas imagens de satélite vieram revolucionar o mercado de imagens orbitais, por sua alta resolução. A concepção de que um *pixel* é composto pela refletância de vários objetos, foi minimizada pelo princípio de que um objeto é composto de vários *pixels*¹. Desta forma, as imagens de satélite vêm se assemelhando cada vez mais com as fotografias aéreas, o que traz novas perspectivas de aplicação do sensoriamento remoto na cartografia sistemática em grandes escalas, até então não contempladas pelas técnicas de sensoriamento remoto orbital.

O recente surgimento no mercado destas imagens proporciona todo um campo a ser explorado, não só na sua área de aplicação, como, também, no refinamento de sua precisão geométrica, pois muitas questões na área destas imagens de alta resolução estão por serem respondidas.

¹ Definição na página 36

1.4 CONTRIBUIÇÃO DA TESE

- Contribuição à metodologia de atualização cartográfica, a fim de que resulte na caracterização das entidades cartográficas planimétricas, rede viária, drenagens e edificações integrando imagens IKONOS e fotos aéreas por meio da monorrestituição digital.
- Contribuição ao sistema de planejamento municipal, mediante a incorporação de informações atualizadas.
- Contribuição à comunidade científica, somando esforços ao enfoque da correção geométrica das informações vetorizadas extraídas de imagem de satélite.

1.5 APRESENTAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho subdivide-se em cinco capítulos: Introdução, Revisão de Literatura, Materiais e Métodos, Resultados e Discussões e Conclusões.

O capítulo introdutório apresenta o objetivo dos mapas municipais e as fontes de informação empregadas na sua elaboração. Apresenta o problema da atualização cartográfica na escala de 1:25000, especificamente, no Estado de Minas Gerais, por ser o financiador da pesquisa, procura responder o porquê da escala de 1:25000 e dos mapas municipais digitais para a atualização e, ainda, apresenta os objetivos e as justificativas da pesquisa.

A Revisão de Literatura procura fazer um apanhado geral das informações mais importantes, ligadas à pesquisa, e que foram subdivididas em: Atualização cartográfica, Características dos mapas municipais, Reambulação de Mapas Municipais, Sensoriamento Remoto, Características geométricas, espectrais e temporais das imagens IKONOS, Monorrestituição digital, Pontos de apoio para aerofotos singulares e imagens de satélite, Modelo digital de terreno, Modelos de matemáticos de correções geométricas de imagens digitais.

O capítulo de Materiais e Métodos apresenta os materiais e a metodologia empregados na pesquisa para realizar a atualização cartográfica do Mapa Municipal digital na escala de 1:25000, integrando imagens IKONOS e fotografias aéreas na escala de 1:30000 por meio da monorrestituição digital.

Os resultados conseguidos com o emprego de diferentes modelos matemáticos para a correção geométrica da imagem IKONOS, na metodologia de atualização, são apresentados e discutidos no capítulo de Resultados e discussões.

O último capítulo, Conclusões, descreve as considerações finais do projeto e propõe algumas sugestões para trabalhos futuros.

Os apêndices I, II e III contêm as minutas de atualização cartográfica da aerofoto e da imagem e o mapa municipal da área de estudo. Os anexos I e II apresentam o mapa municipal da área de estudo e o manual de construção dos mapas municipais.

2.0 REVISÃO DE LITERATURA

Este capítulo apresenta informações importantes para que o leitor possa entender as etapas desenvolvidas nesta pesquisa. Ele se divide em: Atualização cartográfica, Características dos mapas municipais, Reambulação de Mapas Municipais, Sensoriamento Remoto, Características geométricas, espectrais e temporais das imagens IKONOS, Monorrestituição digital, Apoio fotogramétrico, Modelo digital de terreno, Modelos de matemáticos de correções geométricas de imagens digitais: modelos afim e projetivo, DLT (Transformação Linear Direta) e APM (Affine Projection Model – projeção afim paralela).

2.1 ATUALIZAÇÃO CARTOGRÁFICA

A atualização cartográfica se baseia em duas operações principais que são a determinação da necessidade da atualização cartográfica e os processos de atualização da carta ou mapa ROBBI (1990).

O fator dominante da determinação da necessidade de uma atualização cartográfica, não está na idade dos mapas, mas, sim, na quantidade de modificações ocorridas nos elementos representados nela MCGRATH & JOHNSON (1994).

A necessidade da atualização do mapeamento cartográfico de uma base de dados digitais pode ser determinada, segundo MCGRATH & JOHNSON (1994), por grupos de trabalho das agências de mapeamento dispostos em escritórios locais, comparando diretamente o mapa existente com a situação real, pela aquisição de informações em escritórios municipais ou em outras organizações centrais de governo, pelo emprego de fotos aéreas adquiridas de vôos programados por períodos de tempo e por imagens de satélites.

Segundo ROBBI (1990), a escolha da sistemática de atualização orienta-se pela escala do mapeamento, que é definida em função dos objetivos da carta, pelo tipo e método de atualização. O tipo de revisão pode ser: rápida, parcial ou completa. A

diferença entre os tipos de revisão se baseia na escolha dos elementos e áreas a serem revisados. A revisão rápida atualiza somente os principais elementos do mapa, a parcial seleciona as áreas de interesse para o mapa em questão e a completa revisa todos os elementos alterados do mapa (ZUYLEN, 1976).

A periodicidade em que a revisão deve acontecer, ou o método, é também um fator determinante na atualização cartográfica, podendo esta ser contínua, cíclica ou seletiva. A revisão contínua incorpora ao mapa original toda mudança detectada, de maneira a mantê-lo atualizado. A revisão cíclica ocorre em intervalos de tempo pré-definidos, de ano em ano, de cinco em cinco anos, etc. A revisão seletiva está vinculada à urgência da demanda ou pela quantidade de elementos a serem atualizados em determinada área ou mapa (ZUYLEN, 1976).

Os processos de atualização devem, de alguma forma, comparar a situação antiga representada no mapa com a situação real. Esta comparação pode ser feita por observação no terreno, aerofotos, imagens de satélite ou outras fontes de informação. A comparação direta da situação real com a do mapa é onerosa e requer equipes trabalhando continuamente no campo. Os processos de atualização cartográfica requerem, segundo REAGAN & ARMENAKIS (1994), interpretação, detecção de mudanças, aquisição de novos dados e a integração dos dados velhos e novos na base de dados.

As metodologias de atualização com aerofotos podem utilizar processos que empregam a restituição de aerofotos, pares de aerofotos híbridas (fotos antigas e fotos novas) em sistemas estereoscópicos, ortofotos e monorrestituição de aerofotos. A identificação dos elementos de interesse pode ocorrer por comparação direta da foto ou imagem com o mapa, ou pela comparação de fotografias levantadas em diferentes épocas, formando pares híbridos. A restituição estereopares híbridos evidencia na foto os novos elementos, por não apresentar estereoscopia. A comparação do mapa com foto ou imagem procura sobrepor-los, de alguma forma. Nestes procedimentos apresentados, a detecção das alterações é feita visualmente, portanto dependente da perspicácia do operador.

A atualização cartográfica, assim como a construção de cartas, conta com uma grande gama de recursos tecnológicos e métodos que podem ser empregados na sua elaboração. Recursos, estes, que podem vir da coleta de dados com equipamentos topográficos e geodésicos ou mesmo de equipamentos de sensoriamento remoto, incluindo, nesta classificação, os de aerofotogrametria.

As metodologias empregadas são várias. Segundo TAVARES et al. (1996, p.6 13) “a atualização cartográfica sempre foi uma tarefa muito trabalhosa e sujeita a falhas humanas. Visando dinamizar este processo, os cartógrafos têm procurado desenvolver soluções mais rápidas, precisas e menos onerosas para este problema”. Desta forma, um único equipamento pode ser usado em diferentes metodologias. Em busca de precisão e menor custo de operação, as metodologias são utilizadas e aperfeiçoadas. Podem-se citar as metodologias que empregam equipamentos geodésicos e topográficos, cuja precisão é dependente do equipamento e dos dados é dependente do equipamento e se faz, muitas vezes, pelo aumento do tempo de coleta, como é o caso do Sistema de Posicionamento Global por satélites geo-orbitais, conhecido por sua sigla em inglês - GPS. Nesta linha de trabalho, citam-se: RIBAS & SARAIVA (1997), SANTOS et al. (1999).

Em sensoriamento remoto, o aperfeiçoamento dos dados pode ocorrer por meio da fusão de sensores, imagem multiespectral de menor resolução com a pancromática de maior resolução, buscando, assim, aproveitar as características de ambas.

“Una técnica interesante que se há desarrollado hace mucho tiempo, es la de mezclar las imágenes de dos sensores distintos, para aprovechar las características de ambos. El caso más habitual es la mezcla de SPOT XS (multiespectral) con SPOT P (pancromático) para aprovechar la mayor resolución del Pancromático (10m) y la posibilidad del color con las tres bandas de XS”. (ALCÁZAR, 1996, p.4).

Esta técnica, comprovadamente eficiente, foi disponibilizada comercialmente a partir de 1999, pela empresa Space Imaging em seu produto PSN (Pan Sharpened) da imagem IKONOS. Algumas publicações, nesta linha de pesquisa, podem ser citadas:

VIADANA (1995), VERGARA (1995).

Metodologias de atualização cartográficas consagradas que empregam ortofotos e fotos singulares aparecem nos artigos TAVARES et al. (1996), e VILLAREAL (1992) respectivamente.

Segundo LUGNANI (1985, p.76), as metodologias empregadas na atualização cartográfica, para que tenham um desempenho desejável, devem obedecer às características de:

- Qualidade - a carta atualizada não pode possuir qualidade inferior à original;
- Detecção de alterações – necessita ser a mais completa possível e a dependência de comparações visuais de imagens estáticas deve ser mínima;
- Alvos de apoio de campo – precisam ser perenes e identificáveis nas imagens;
- Atualização permanente - a carta deve ser mantida praticamente atualizada.

A qualidade dos dados espaciais, segundo LEAL (1998) é alvo de estudo do CEN (European Committee for Standardisation) da ISO (International Standardisation Organisation), pois as diretrizes que determinam a uniformidade dos trabalhos cartográficos analógicos não contemplam a cartografia digital.

Segundo LEAL (1998), no Brasil o controle de qualidade dos produtos cartográficos se verifica no ato da contratação do serviço por meio das exigências mínimas. Sendo assim o produtor é quem controla a precisão do material cartográfico, mas cabe ao usuário certificar-se da acurácia do produto.

A passagem da cartografia analógica para a digital pode apresentar erros de resolução da mesa, na deformação do original analógico - papel ou filme - do equipamento de varredura ou mesmo do operador, estas cartas merecem uma reavaliação, isto é, uma reclassificação. (FERREIRA et al., 1994, p.56) confirmam esta afirmação: "... uma carta originalmente classe A, ao ser digitalizada pode gerar dados piores que uma carta classe C." (ALVES, 1990, p.76) corrobora esta afirmação quando diz: "O problema de qualidade de dados necessita a análise de múltiplos aspectos, já que diferentes processos podem representar fontes de erros". O estudo

estatístico que vem contribuir nesta linha de análise da qualidade das cartas digitais é apresentado por LEAL (1998).

Um fator que influencia decisivamente na qualidade da atualização é a capacidade de detecção das alterações ocorridas com o tempo e esta capacidade está diretamente vinculada ao conteúdo informativo da imagem atualizada, quer sejam fotografias aéreas e ou imagens orbitais, segundo LUGNANI (1985), VIADANA (1995).

A detecção de alterações tem sido o foco de estudos destes últimos anos. O problema da detecção automática ou semi-automática de elementos é o assunto da maioria dos artigos apresentados em congressos nacionais e internacionais de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto e nesta linha de pesquisa citam-se os autores: LUGNANI (1985), VIADANA (1995), STRAUB et al. (2000), AMORIN (2001).

Já a manutenção de uma carta praticamente atualizada é um problema de difícil solução, pois, as cartas em áreas de atividades humanas concentradas são candidatas à atualização tão logo sejam publicadas. As pesquisas nesta área, portanto, vem contribuir para minimizar este problema, mas sua solução requer altos e constantes investimentos das agências de governo responsáveis pelos mapeamentos.

2.2 CARACTERÍSTICAS DOS MAPAS MUNICIPAIS

O mapa municipal elaborado pelo IGA é construído pelo processo de compilação da folha da carta do Brasil, isto é, por meio da digitalização manual das cartas em uma mesa digitalizadora, com resolução de 0,0125mm. A compilação empregada pode ser classificada, conforme definição de KEATES (1989), como compilação de mapas derivados homogêneos, por se basearem diretamente do mapa fonte.

As informações marginais de um mapa municipal são construídas a partir de fontes diferentes, que são: mapas chaves e ou plantas cadastrais, mapa rodoviário e mapa geopolítico. Os mapas chaves e ou plantas cadastrais são empregadas na

elaboração do encarte da área central da cidade. O mapa de sua localização geográfica no Estado de Minas Gerais origina-se do mapa geopolítico. A posição geográfica do município tem como base o mapa rodoviário com suas principais estradas e municípios vizinhos. Estas diferentes fontes empregadas na construção do mapa municipal não caracterizam sua compilação como sendo de mapas derivados heterogêneos, pois, o corpo principal do mapa é essencialmente elaborado a partir de uma única fonte, a carta do mapeamento sistemático do Brasil.

O mapa municipal representa os aspectos topográficos de um município como unidade administrativa, ou seja, determinado o limite municipal (unidade administrativa) sobre uma carta do mapeamento sistemático, conforme descrito na Lei que o criou, são representados os aspectos geográficos naturais e artificiais referentes a esta unidade. Pode-se dizer que os aspectos geográficos naturais e artificiais (elementos básicos) de um mapa municipal são, em sua maioria, os constantes na carta topográfica que lhe servirá de base, podendo esta carta estar na escala de 1:100000, 1:50000 e 1:25000. A seleção destes elementos varia de acordo com a escala final do mapa, tendo em vista que estes se destinam à impressão em papel. Alguns elementos básicos do mapa municipal são simplificados e outros omitidos em relação à sua carta-origem. Como exemplo de elemento simplificado têm-se as estradas e como exemplo de elemento omitido têm-se as áreas de vegetação.

Citam-se como elementos básicos de um mapa municipal:

- Limites estadual, municipal e distrital.
- Redes de alta e baixa tensão.
- Referências de Nível (RN).
- Pontos cotados.
- Igrejas, escolas, minas, indústrias, campos de pouso, as torres de rádio e telefonia são representados como marcas terrestres com um símbolo próprio.
- Rodovias: auto-estrada, estrada pavimentada, em construção, sem pavimentação, leito natural e caminho.

- Área urbana
- Hidrografia: curso d'água permanente, intermitente. Lagoas, represas. Brejo, pântano, terreno sujeito à inundação, rápidos e cachoeiras.

A construção dos mapas municipais tem sido dinâmica desde a sua criação, procurando atender às necessidades dos contratantes municipais e prefeitos municipais, enfocando temas essenciais às suas atividades de planejamento ou dando-lhes suporte para que possam cumprir as exigências de outros órgãos estaduais na busca por recursos financeiros para o município.

Em sua última versão, 2001, a rede viária está priorizada atendendo a uma exigência do DER-MG (Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de Minas Gerais) para a liberação de verbas destinadas à manutenção das estradas dos municípios.

2.3 REAMBULAÇÃO DE MAPAS MUNICIPAIS

Reambulação é a coleta de topônimos, dados e informações, relativos aos acidentes naturais e artificiais, tais como os elementos hidrográficos, demográficos, propriedades rurais, indústrias, igrejas, escolas, minas e outros elementos constantes na área a ser mapeada.

Os materiais que o reambulador necessita para realizar a atividade de campo são: carta topográfica, planta cadastral, prancheta e GPS de navegação.

Nessa operação são realizadas atualizações nos topônimos dos elementos planimétricos e altimétricos selecionados de acordo com a escala de impressão da carta. As estradas são classificadas conforme manual definido para os mapas municipais. As construções civis erguidas após a elaboração da base cartográfica são localizadas no mapa e, no caso de estradas, o reambulador procura traçá-las, o mais próximo possível da realidade, observando os acidentes naturais da região e identificando-as com um rótulo de alinhamento aproximado ou com o auxílio do GPS de navegação.

Para resolver problemas relativos ao limite municipal são elaborados estudos mais aprofundados, sobre a lei que criou o município, baseados na toponímia da época de definição da divisa, existentes em documentação cartográfica da referida época e da pesquisa de campo. Se necessário, a reconstituição e/ou demarcação física da divisa é feita com equipamentos geodésicos.

Para o mapa municipal, os dados reambulados são anotados na folha da carta, utilizando-se símbolos e convenções baseados no manual técnico de Reambulação, BRASIL (1975), porém, na parte planimétrica, alguns elementos obedecem a uma classificação própria do IGA, criada para estes mapas. São eles:

- as rodovias, que obedecem às classificações de: auto-estrada, pavimentada, em pavimentação, sem pavimentação, leito natural;
- as localidades, que podem ser cidades, distritos, povoados e lugares denominados.

As edificações que são alocadas pelo reambulador conforme sua importância na região, pois nem todas as edificações rurais são representadas no mapa municipal, por este não se tratar de um cadastro rural.

Os principais equipamentos urbanos da parte central da área urbana do Município a ser mapeado são representados em um encarte e aparece como um dado marginal, no mapa municipal.

2.4 SENSORIAMENTO REMOTO

2.4.1 Introdução

O sensoriamento remoto é definido por LILLESAND & KIEFER (1994) como a ciência e arte de se obter informações acerca de um objeto, área ou fenômeno, por meio de sensores que não estão em contato com aqueles elementos, isto é, a uma distância remota do fenômeno. Estes sensores podem ser classificados em ativos e passivos. Os sensores ativos emitem sua própria energia e captam parte da energia

eletromagnética refletida pelos alvos da superfície, como exemplo tem-se o RADAR (Radio Detection and Ranging). Os sensores passivos dependem de fonte externa de radiação de energia (o sol) e captam a radiação eletromagnética dos alvos. Estas radiações eletromagnéticas podem ser luz, calor, ondas de rádio, entre outras.

A radiação eletromagnética é detectada em uma faixa ampla de comprimentos de onda, denominada de espectro eletromagnético. A amplitude da faixa da radiação eletromagnética é determinada entre os comprimentos de onda de 10^8 a 10^{15} metros. Este espectro é subdividido em canais ou bandas, cujos limites são flexíveis e associam-se às características dos alvos da superfície e dos processos de detecção dos sensores (PINTO 1998).

As regiões estudadas do espectro eletromagnético em sensoriamento remoto são agrupadas por VILLAR (1996), conforme a tabela 1 a seguir:

TABELA 1: REGIÕES ESTUDADAS DO ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO EM SENSORIAMENTO REMOTO

Regiões do Espectro eletromagnético	Faixas	Comprimentos de onda (μm)
Luz visível	Azul	0,4 a 0,5
	Verde	0,5 a 0,6
	Vermelho	0,6 a 0,7
Infra-vermelho	Próximo	0,7 a 1,5
	Médio	1,5 a 6
	Térmico	3
	Distante	6 a 1000
Micro-ondas e radares		1000 a 1000000

A interação entre a matéria e a radiação eletromagnética fornece diferentes respostas espectrais, que são uma preciosa fonte de informação na interpretação das características dos fenômenos, pois a radiação solar pode ser refletida, absorvida ou transmitida pelo alvo.

O registro da energia refletida ou emitida pelos alvos é feito por sensores capazes de gerar produtos na forma de gráficos (radiômetros), perfis, imagens analógicas e digitais. Desta forma, os sensores são classificados quanto ao produto que eles geram, em imageadores e não imageadores. Nesta pesquisa, interessa somente os sensores imageadores.

Os sensores imageadores subdividem-se em imageadores de quadro e imageadores de varredura. Os imageadores de quadro geram uma imagem como um todo em um dado instante e, já nos de varredura, a imagem é formada a partir de uma sequência de linhas, caso do sensor de varredura eletrônica ou *push-broom*.

O sistema de varredura eletrônica possui um sistema óptico constituído por uma lente grande angular que focaliza a superfície como um todo, dentro da geometria de visada, definida pela óptica e altitude da plataforma. O fluxo de radiação é, então, dirigido para a matriz linear de detectores permitindo desta forma, o imageamento instantâneo de uma linha completa do terreno. Cada detector é responsável por amostrar a radiação referente a cada elemento de resolução no terreno (IFOV) (PINTO, 1998).

De um modo geral, os sensores têm como componentes básicos, o sistema óptico, os detectores, a unidade eletrônica de processamento e a unidade de saída. O sistema óptico é responsável pela captação da energia radiante refletida ou emitida pelos alvos. Os detectores se encarregam de converter a energia radiante em sinal e registrar a informação coletada. A unidade eletrônica tem o papel de processar e ampliar o nível do sinal por meio de um processador de sinal e amplificador. Compõem, ainda, a unidade eletrônica uma unidade de potência e um painel de controle. A unidade de saída possui um painel mostrador e ou unidade de armazenamento dos dados.

O efeito combinado das componentes distintas do sistema de sensor define a sua habilidade de registrar, discriminar e informar detalhes, ou seja, sua resolução. A resolução de um sistema pode ser classificada em: espacial, temporal, espectral e radiométrica.

A resolução espacial é definida pelo campo de visão instantâneo (IFOV), que é uma seção angular medida em radianos, observada em um determinado momento. Ela é dependente da altura da plataforma, do sistema óptico e da dimensão do detector. A projeção do detector pelo sistema óptico sobre o alvo, determina o elemento de resolução no terreno, ou seja, o tamanho da unidade mínima de informação incluída na

imagem, “o *pixel*”.

A resolução temporal é a periodicidade com que o sensor adquire a imagem de uma mesma região. Este ciclo é dependente da velocidade, da inclinação e altura da plataforma, além das características do sensor.

A resolução espectral está relacionada à largura da faixa espectral que o sistema de sensor pode discriminar por meio de seus detectores e filtros. Quanto maior for o número de faixas espectrais e menor for a largura das faixas, melhor será a resolução espectral de um sistema de sensor.

Resolução radiométrica é a capacidade do sensor de detectar variações na radiância espectral nele incidente. Ela indica o número de níveis digitais da imagem (NC). Quanto maior a resolução radiométrica, melhor a capacidade de interpretação do sensor.

2.4.2 Características Espectrais dos Alvos

As principais feições da superfície do terreno que são representadas em uma imagem de sensoriamento remoto são os corpos d’água, vegetação, solo, gelo e elementos urbanos. As características espectrais destas feições possuem comportamentos diferentes nas diversas faixas do espectro eletromagnético. A escolha das bandas mais apropriadas para um mapeamento está vinculada ao comportamento espectral dos alvos presentes na imagem.

Os elementos de interesse nesta pesquisa são as feições: solo, água, estradas e edificações e suas características espectrais estão representadas na figura 1. Ressalta-se que a figura 1 está representando somente a parte do espectro eletromagnético onde opera o satélite IKONOS II.

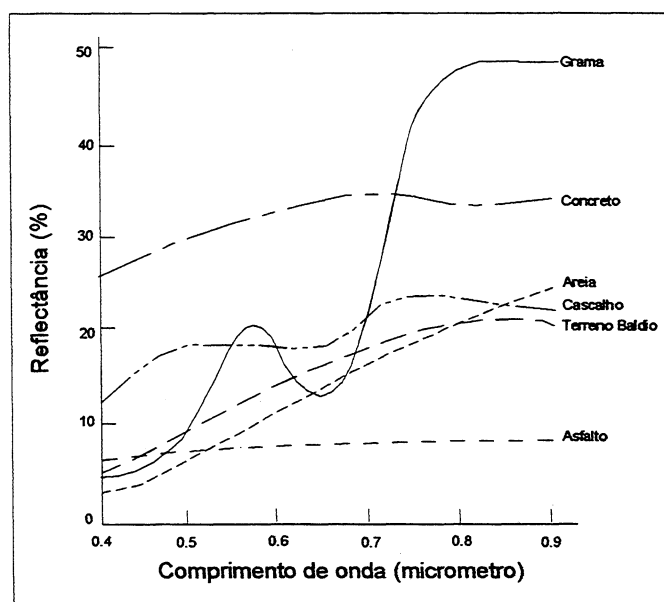
Analisando a figura 1, pode-se afirmar que:

- As feições com cobertura de asfalto têm o mesmo comportamento espectral em todas as regiões com comprimento de onda de 0,4 a 0,9 μm e baixa refletância, em torno de 8% nas diferentes bandas do espectro. As feições com componentes de asfalto aparecerão na imagem em tonalidades escuras;

- As feições de concreto por outro lado refletem de 25 a 35% da energia eletromagnética recebida. Na imagem, estas feições são representadas por tons claros.

A resposta espectral dos solos é dependente do teor de umidade, da quantidade de matéria orgânica, da textura, do teor de ferro, da presença de argila, silte e areia que o compõem. Pode-se assegurar que as diferentes propriedades físicas e químicas das componentes dos solos alteram suas características de refletância.

FIGURA 1 - CURVAS ESPECTRAIS DAS ÁREAS URBANAS



FONTE: VIADANA (1995)

A refletância dos solos secos varia conforme a mistura de materiais que o compõem, como também a textura dos mesmos. A textura do solo está associada com o tamanho das partículas que o compõem. A refletância aumenta com a diminuição do diâmetro da partícula. A forma desta partícula também está associada à taxa de reflexão da superfície, possuindo, as formas irregulares, maior capacidade de dissipação da energia do que as formas regulares.

A cor do solo define maior ou menor refletância dos alvos, muitas vezes independente de sua textura. Exemplo disto é a alta refletância da areia de textura grosseira, se comparada com a baixa refletância do solo do tipo orgânico, de textura mais fina. A composição química é a causa da cor dominante que se percebe no solo.

O calcário tem a cor branca, o que indica alta refletividade em todas as bandas, já os solos argilosos apresentam maior refletância na banda do vermelho, devido ao óxido de ferro de sua composição. A refletância também é maior para solos sem matéria orgânica e com textura fina.

A umidade do solo é inversamente proporcional à sua refletância, ou seja, quanto maior for o teor de umidade, menor será a refletância em todas as regiões do espectro.

Segundo VIADANA (1995) num ambiente natural a água absorve quase toda a energia incidente nos comprimentos de ondas do infravermelho e infravermelho próximo. A refletância da água varia de acordo com o comprimento de onda e as variações das condições das mesmas, por exemplo a água turva apresenta uma refletância significativamente superior à da água límpida.

2.4.3 Distorções geométricas das imagens de satélite

As imagens de satélite possuem distorções geométricas que podem ser consideradas erros sistemáticos e não sistemáticos. Como fontes de erros sistemáticos de citam-se: distorção panorâmica, variação da velocidade da plataforma e rotação da Terra. Exemplos de fontes de erros não sistemáticos têm-se as variações na altitude do terreno e na atitude do satélite.

Segundo BERNSTEIN (1983)², citado por JENSEN (1996), algumas distorções podem ser corrigidas por meio da análise das características do sensor e efemérides, sem a necessidade de pontos de controle. Estas são: as distorções provocadas pela variação da velocidade da plataforma, pela rotação da Terra, pelos efeitos panorâmicos relacionados à geometria de imageamento, entre outros. Os erros não sistemáticos de atitude do sistema de sensor e de variação da altitude podem ser minimizados mediante a aplicação de pontos de controle.

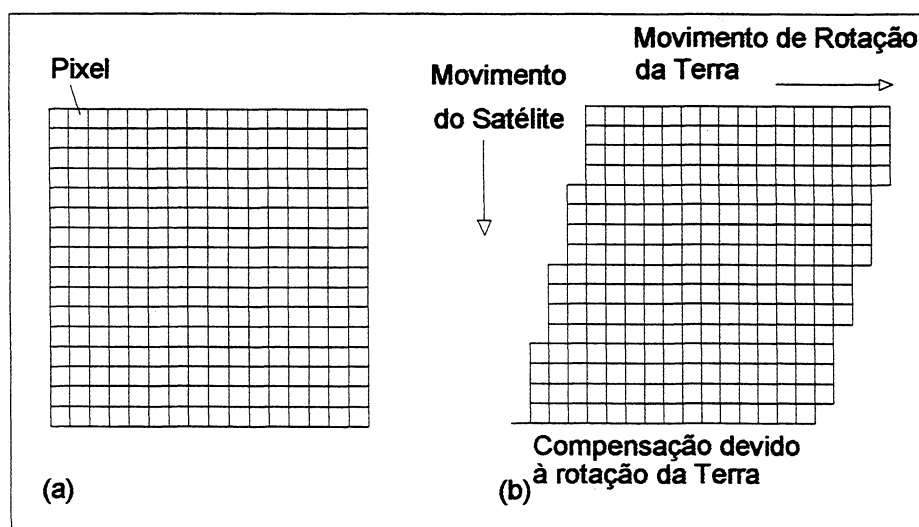
² BERNSTEIN, R., Image geometry and rectification. In: COLWELL, R. N., Manual of remote sensing. Bethesda, MD: American Society of Photogrammetry, 1983. p.875-881.

As distorções geométricas das imagens relacionadas pelos fatores de rotação da Terra durante o tempo de aquisição da imagem, do efeito panorâmico relacionado à geometria de imageamento, das variações da altitude, da velocidade e da atitude da plataforma e da curvatura da Terra são explicados nos itens 2.4.3.1, 2.4.3.2, 2.4.3.3, 2.4.3.4, 2.4.3.5.

2.4.3.1 Distorção devido à rotação da Terra durante o tempo de aquisição da imagem

Segundo RICHARDS (1993), o movimento de rotação da Terra provoca deslocamento para Oeste nas linhas adquiridas na janela durante o tempo de aquisição destas. Se as linhas da imagem forem arranjadas sobre uma grade regular, essas estarão deslocadas para Leste, em relação ao terreno que elas representam. Para correção da posição relativa do pixel no terreno, é necessário compensar este deslocamento. Estes deslocamentos, pelos quais as linhas da imagem precisam ser corrigidas para Oeste, são dependentes da velocidade do satélite, da velocidade de rotação da Terra (que varia com a latitude da área imageada) e do comprimento da janela registrada.

FIGURA 2 - EFEITO DA ROTAÇÃO DA TERRA NO TEMPO DE AQUISIÇÃO DA IMAGEM. (A) IMAGEM ORGANIZADA EM UMA GRADE (B) RECUO DE LINHAS SUCESSIVAS PARA OESTE, DEVIDO AO MOVIMENTO DE ROTAÇÃO DA TERRA DURANTE AO TEMPO DE AQUISIÇÃO DA IMAGEM



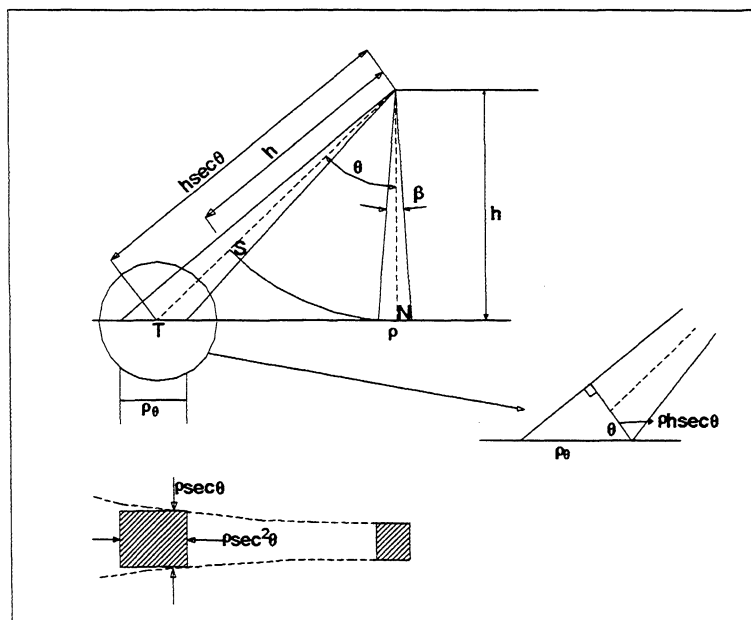
FONTE: RICHARDS, 1993
 NOTA: ADAPTADA DE (RICHARDS, 1993)

2.4.3.2 Distorção panorâmica

O ângulo do campo de visão instantâneo (IFOV) é constante, porém o tamanho do pixel no terreno é maior na extremidade da linha de varredura do que no nadir, devido ao ângulo de observação. Observando a figura 3, se o IFOV é β , o tamanho do pixel no nadir é p e a dimensão do pixel na linha transversal de varredura cresce de maneira proporcional à secante do ângulo (θ). Na direção de varredura o valor do pixel é $p \sec^2 \theta$ sendo θ igual ao ângulo de observação medido a partir da posição nadiral.

Este efeito é negligenciável para sistemas com pequenos valores de campo de visão e significativos para sistemas, tais como o NOAA e sistemas aerotransportados com FOV igual a 80° , onde o tamanho do pixel ao longo da linha de varredura é 70% maior do que na região do nadir.

FIGURA 3 - DISTORÇÃO PANORÂMICA



FONTE: RICHARDS, (1993)

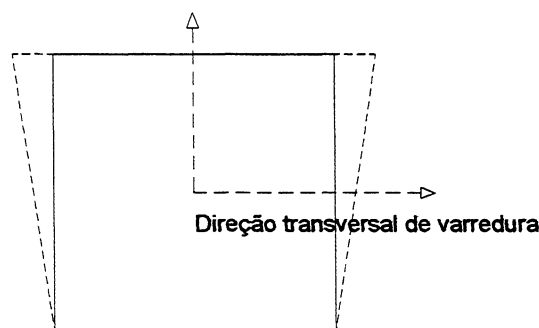
Os dados capturados pelo sensor são organizados para formar uma imagem. Os *pixels* são representados por um mesmo tamanho de grade na linha de varredura transversal, enquanto suas correspondentes áreas no terreno não o são. Há, então, uma

compressão de dados da imagem em direção aos seus extremos. Esta distorção de escala na direção transversal de trajetória é dada pela relação $\overline{SN}/\overline{TN}$ (figura 3) e é igual a $\theta/\tan\theta$. Fazendo analogia ao exemplo apresentado para o Landsat por RICHARDS (1993), o IKONOS com um campo de visão igual a $0,931^\circ$ tem uma distorção de escala igual a 1, ou seja, não significativa para a imagem IKONOS.

2.4.3.3 Distorção devido às variações na altitude da plataforma

As variações nas elevações ou altitudes da plataforma acarretam mudança nas dimensões da imagem, pois o tamanho do *pixel* depende do *IFOV* e da altura “h” como é visto na figura 3. O tamanho da área também, é alterado pois ele depende do FOV e da altitude da plataforma (h). A figura 4 apresenta a variação no tamanho do *pixel* na direção transversal de varredura, devido à mudança de altitude da plataforma.

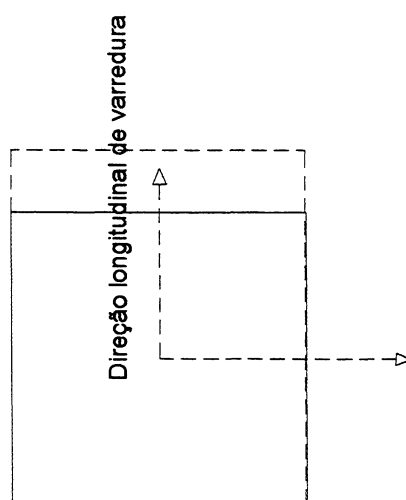
FIGURA 4 - DISTORÇÃO DEVIDO À ALTITUDE



2.4.3.4 Distorção provocada pela variação da velocidade da plataforma

Se há alteração na velocidade da plataforma no momento da varredura, uma variação da escala vai ocorrer na mesma direção. A figura 5 exemplifica esta deformação do *pixel* que vai ocorrer na direção longitudinal de varredura.

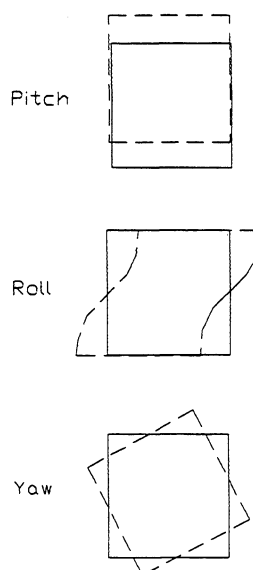
FIGURA 5 - DISTORÇÃO PROVOCADA PELA MUDANÇA DE VELOCIDADE DA PLATAFORMA



2.4.3.5 Distorção provocada pela variação da atitude do satélite

A mudança na trajetória do satélite (atitude da plataforma), representada pelos ângulos *yaw*, *pitch* e *roll* (guinada, arfagem, rolamento), provoca rotação e deslocamentos ao longo e no sentido transversal da varredura. A figura 6 explica as deformações de cada um destes ângulos na formação dos pixels.

FIGURA 6 - DESLOCAMENTOS PROVOCADOS PELAS VARIAÇÕES DA ATITUDE DO SATÉLITE



FONTE: ADAPTADA DE RICHARDS, (1993)

Segundo BRUM (1999), em uma visada vertical, “a existência de ângulos não nulos de rolamento e/ou arfagem resulta num deslocamento no centro da cena imageada com relação à posição nominal, enquanto a não nulidade do ângulo de guinada modifica a distorção devida à rotação da Terra.”

2.4.3.6 Distorção provocada pela curvatura da Terra

O efeito de curvatura da Terra pode ser negligenciado quando se trata de fotografias aéreas, pois a baixa altitude da espaçonave cobre uma pequena faixa do terreno. Para satélites como o NOAA que varrem grandes faixas de terreno, com largura de 2700km a uma altitude de 833km, este efeito causa um erro 2.3% sobre o tamanho da faixa deste. A dimensão linear dos pixels extremos da direção transversal de varredura é menor do que seu valor real, por causa do efeito da curvatura da Terra. As imagens de satélite Spot, Landsat e IKONOS não são afetadas por causa de suas estreitas faixas de varredura.

2.5 CARACTERÍSTICAS ESPECTRAIS, RADIOMÉTRICAS, GEOMÉTRICAS E TEMPORAIS DA IMAGEM IKONOS

Lançado em 24 de setembro de 1999, o satélite IKONOS II é o primeiro satélite civil a entrar em operação, com resolução superior a 1m. Construído para fornecer imagens da Terra no modo pancromático e multiespectral com resolução geométrica de 1m e 4m respectivamente, com o arranjo linear de sensores que podem ser inclinados a 26° fora do nadir, possui um sistema equipado com antenas GPS e três rastreadores estelares digitais para estabelecer a posição e atitudes precisas da câmara.

Como outros satélites artificiais que transportam os sistemas imageadores de Sensoriamento Remoto, o IKONOS II percorre uma órbita polar e solsíncrona com uma inclinação de 98,1° em relação ao norte. Isto quer dizer que o satélite passa pelo mesmo ponto da superfície do terreno na mesma hora local, ou seja, cruza o equador no mesmo horário, às 10:30h (hora local). A velocidade do satélite sobre a Terra é de 6,79km/s e a altitude da plataforma é de 681km, elementos que juntamente à órbita

polar, determinam o tempo de 98,3 minutos para se completar uma volta em torno da Terra (período orbital), percorrendo a órbita no sentido Norte-Sul.

Esta altitude foi escolhida de maneira a atender a um padrão único de visita diária. Observações sobre um mesmo ponto da superfície podem ocorrer, na região do equador, com um grau de inclinação, em 140 dias, ou cada dez graus de obliquidade a cada 11 dias. A capacidade do satélite IKONOS de efetuar visadas transversais à sua órbita, num ângulo de 45°, aumenta a frequência da re-visita, chegando a ser 2,9 dias no modo pancromático e 1,5 dia no modo multiespectral, para observações sobre o Equador. Entretanto, as visadas transversais aumentam o tamanho do *pixel* no terreno. (GERLACH, 2000).

As imagens IKONOS são capturadas e processadas por um sistema de câmara constituído de um telescópio com distância focal igual a 10m e um arranjo linear de sensores que operam na faixa de comprimento de onda de 0,4 a 0,9 μm e por processadores eletrônicos. Uma vez que as imagens tenham passado através do telescópio, elas entram na unidade de plano focal onde uma série de arranjos lineares pancromático e multiespectral capturam os dois tipos de imagens quase que simultaneamente, com diferença de 0,5 segundo entre as capturas. Estes arranjos lineares de sensores CCD (*charge coupled device*) convertem a radiação eletromagnética em cargas elétricas, que são representadas por valores digitais. Uma unidade de processamento digital compacta e formata a imagem digital para sua transmissão às estações, em Terra (KODAK, 2001).

A geometria da imagem IKONOS, segundo LI et al. (2000) é similar a de outros *scanners push-broom*. Um arranjo linear de detectores é montado ortogonalmente à direção de voo, dentro do plano focal da lente. Neste modo de capturar imagens, perfis unidimensionais são eletronicamente exemplificados, de tal maneira que um arranjo linear completo é lido durante o tempo de integração. A coleta de dados para a formação de pares esteresocópicos é programada nas posições do seu arranjo linear de 26° para frente, para o nadir e de mais 26° pós-nadir. Com imagens convergentes da mesma área, é possível gerar pares estereoscópicos com ângulo de convergência de 26° e 52°. Como o intervalo de coleta entre as tomadas é mínimo, há pouca variação das

condições atmosféricas para a área imageada, o que, segundo PARKER³ citado por LI et al. (2000) assegura uma alta qualidade na coleção de imagens. A coleção de imagens estereoscópicas cobre uma faixa de 11km de largura.

O efeito combinado das distintas componentes do sistema de sensor define a sua habilidade de registrar, discriminar e informar detalhes, ou seja, sua resolução. As resoluções de um sensor podem ser agrupadas em: espacial, espectral, radiométrica e temporal.

A resolução espacial é igual a 0,82m e 3,26m no modo Pancromático e Multiespectral respectivamente com IFOV é de 1,2μr (micro-radiano) e 4,8μr. No sistema IKONOS, o tamanho do detector é de 12μm no pancromático e 48μm no multiespectral e 13816 detectores definem o campo de visada (FOV) de 11km no nadir e 13km no off nadir (26°).

O satélite IKONOSII opera na faixa espectral de 0,45 a 0,90μm no modo pancromático e no multiespectral esta faixa é subdividida em 4 canais que são de 0,45 a 0,52μm para o azul, de 0,52 a 0,60μm para o verde, de 0,63 a 0,69μm para o vermelho e de 0,76 a 0,90μm para o infravermelho próximo.

Diferente de todas as outras imagens, a imagem IKONOS possui resolução radiométrica de 11bits e uma resolução temporal de 140 dias podendo, no entanto, o satélite ser programado para tomadas laterais com uma resolução temporal de 1,5 dia para a multiespectral e 2.9 dias para a pancromática.

Os produtos IKONOS, comercialmente disponíveis, podem variar quanto ao padrão de correção oferecido pelo fornecedor da imagem. Estes produtos têm emprego diferenciado devido às suas várias precisões. A tabela 2, elaborada por GERLACH (2000), mostra a precisão das imagens IKONOS nos seus vários padrões e as escalas dos mapas correspondentes às suas precisões.

³ PARKER, J., **The advantages of in-track stereo acquisition from high-resolution earth resources satellites**. In: Proceedings of ACSM/ASPRS Annual convention & Exposition, Seattle, WA, Vol.3 1997.p.276-282.

TABELA 2 - PRECISÃO DAS IMAGENS IKONOS NOS SEUS VÁRIOS PADRÕES

Produto/ Nível	Desvio padrão (m)	Escala de mapa correspondente à precisão
GEO	23,3	1:100000
Reference	11,8	1:50000
Map	5,7	1:24000
Pro	4,8	1:12000
Precision	1,9	1:4800
Precision Plus	0,9	1:2400

Além das imagens IKONOS pancromáticas e multiespectrais com variadas correções, a Space Imaging, fornecedora destes produtos, disponibiliza uma combinação de imagens pancromáticas com multiespectrais, chamada de *Pan Sharpening (PSM)*. Este produto é a fusão da imagem pancromática com a multiespectral, fornecendo, assim, uma imagem com resolução de 1 metro e características da multiespectral. A fusão de imagens é uma conhecida técnica que emprega as transformações RGB (*red, green, blue*) para IHS (*Hue, Saturation, Intensity*). As imagens multiespectrais (RGB) são transformadas para o sistema de cores IHS através de algoritmos matemáticos que relacionam os dois espaços de cores. Substitui-se a intensidade desta transformação pela intensidade da imagem pancromática. Reverte-se a imagem IHS para o sistema RGB. O resultado desta técnica é uma imagem colorida com a resolução geométrica da imagem pancromática. A composição colorida é fornecida nas opções: cor natural ou falsa-cor.

2.6 MONORRESTITUIÇÃO DIGITAL

Monorrestituição é uma técnica de restituição monocular de aerofotos singulares, desenvolvida por MAKAROVICK (1973). Ela aplica um conjunto de transformações de coordenadas entre os espaços da imagem e da superfície do modelo de referência e da superfície de projeção.

A fundamentação matemática básica da monorrestituição consiste em transformar as coordenadas fotogramétricas de pontos observados na aerofoto para o referencial do terreno, empregando-se a equação de colinearidade inversa e o modelo digital de terreno (DTM). Estas coordenadas são transformadas para o referencial de

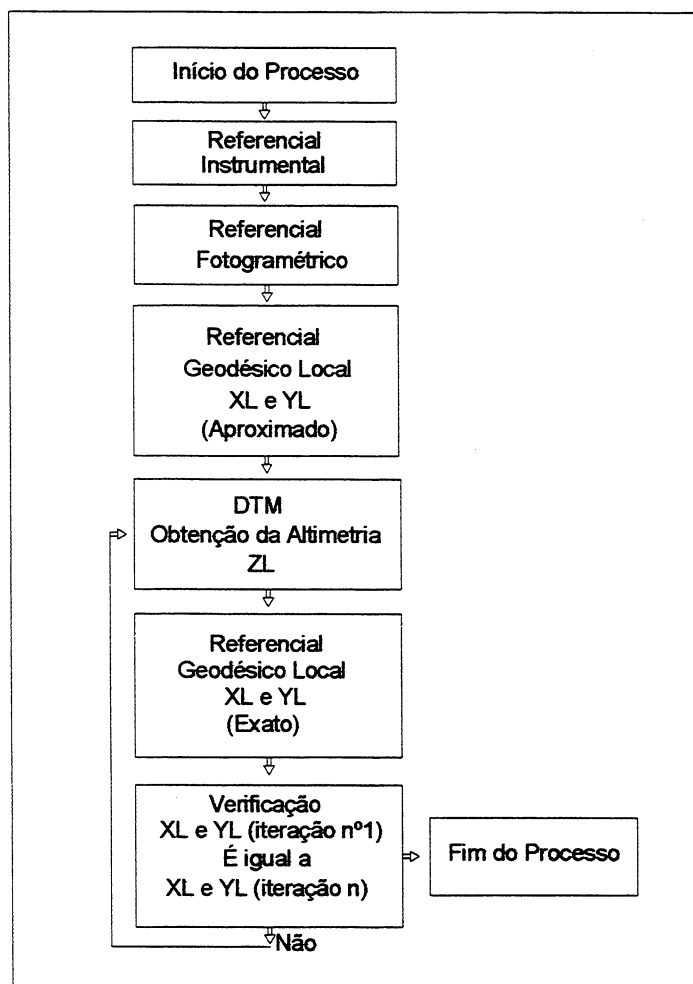
um sistema de projeção cartográfica para a elaboração do mapeamento digital vetorial em um sistema de computação gráfica CAD. (*Computed Aided Design*).

Segundo MITISHITA (1997) as fases da monorrestituição são:

1. No início do processo a entidade gráfica possui pontos no referencial de desenho ou do plano gráfico.
2. Estas coordenadas no referencial do desenho são transformadas para referencial fiducial e posteriormente para o referencial fotogramétrico, realizando assim a orientação interior.
3. As coordenadas fotogramétricas são transformadas para coordenadas geodésicas locais planas empregando-se a transformação projetiva no plano. Esta transformação gera coordenadas geodésicas locais planas aproximadas, pois o modelo matemático empregado não corrige as discrepâncias devido à atitude do avião e altitude do terreno, mas, no entanto servem como ponto de partida para a determinação de coordenadas mais precisas - “exatas” - no processo de monorrestituição.
4. Tendo-se a coordenada geodésica local plana aproximada determina-se no modelo digital de terreno a coordenada altimétrica.
5. Empregando-se a coordenada fotogramétrica, a coordenada altimétrica do ponto, os parâmetros de atitude definidos anteriormente pela resseção espacial e a equação de colinearidade na forma inversa, determina-se a coordenada geodésica do ponto digitalizado. A figura 7 esquematiza o sistema de monorrestituição.

Sugestões de utilização, aplicações práticas e variações matemáticas do modelo proposto por MAKAROVICK (1973), e podem ser encontradas em (MASRY, 1979), (LUGNANI, 1985), (VILLARREAL, 1992), (DAL POZ, 1993).

FIGURA 7 - SISTEMA DE MONORRESTITUIÇÃO DIGITAL



FONTE: MITISHITA (1997, P. 121)

2.6.1 Orientação interior analítica

O primeiro passo para a monorrestituição é a orientação interior da fotografia, que tem por finalidade recuperar a posição da fotografia em relação à câmara aérea na hora de sua tomada, permitindo, assim, a reconstrução do feixe perspectivo que forma a fotografia.

Para atingir este objetivo, a orientação interior nos equipamentos analíticos e digitais é fundamentada em modelos matemáticos capazes de realizar a transformação entre os referenciais instrumentais e fiduciais.

O referencial instrumental está ligado aos dispositivos capazes de quantificar os movimentos nos equipamentos utilizados para a realização das observações fotogramétricas. A grade de condutores eletrônicos de uma mesa digitalizadora define um referencial instrumental capaz de quantificar os movimentos desta, sendo, portanto, capaz de realizar observações fotogramétricas e monoscópicas de aerofotos. O sistema de visualização de tela um computador determina um outro referencial instrumental, onde as coordenadas instrumentais são definidas por linhas e colunas. MITISHITA (1997), ANDRADE (1998), WOLF (1983).

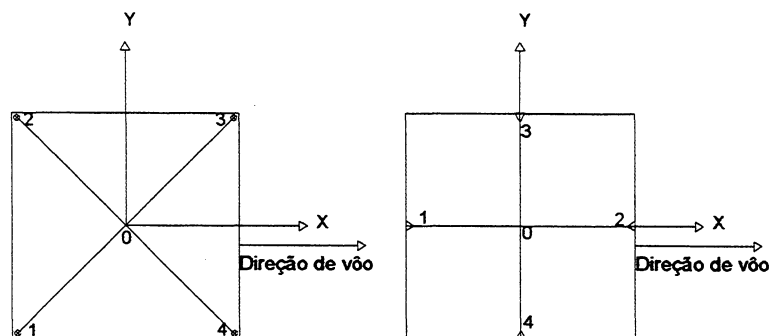
O referencial fiducial é definido pelas marcas fiduciais fixadas na região do plano focal do cone da câmara, sensibilizadas no filme na hora da tomada da foto. O número de marcas pode variar de 4 a 16 de acordo com a época de fabricação da câmara e sua localização, na foto, modifica-se conforme o fabricante. As marcas fiduciais servem para materializar o referencial fiducial, corrigir a deformação provocada pelo filme e restabelecer a geometria projetiva nos equipamentos. As deformações provenientes do trabalho do filme originam-se das diferenças entre as condições ambientais, no instante da tomada da foto e da observação.

O sistema de coordenadas fiduciais tem como origem a interseção das retas que passam pelas marcas fiduciais opostas. O eixo X está direcionado para a linha de vôo. O eixo Y é perpendicular ao eixo X e formam um sistema dextrógiro de coordenadas. É um sistema bidimensional. A figura 8 apresenta o referencial fiducial de uma aerofoto com 4 marcas fiduciais.

As coordenadas fiduciais destas marcas, as constantes de correção da deformação provocada pelas lentes e a coordenadas do ponto principal no referencial fiducial são fornecidas pelo certificado de calibração da câmara.

O modelo matemático da orientação interior pode variar conforme a quantidade de marcas fiduciais encontradas nas aerofotos. O número de marcas fiduciais depende do ano de fabricação da câmara aerofotogramétrica. O modelo mais comum de câmara encontrado no mercado possui 4 marcas fiduciais.

FIGURA 8 - REFERENCIAL FIDUCIAL DE UMA AEROFOTO COM 4 MARCAS FIDUCIAIS



A transformação matemática mais empregada é a transformação afim, no plano que se apresenta pela equação 1.1:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

onde:

x' e y' = coordenadas no fiducial;

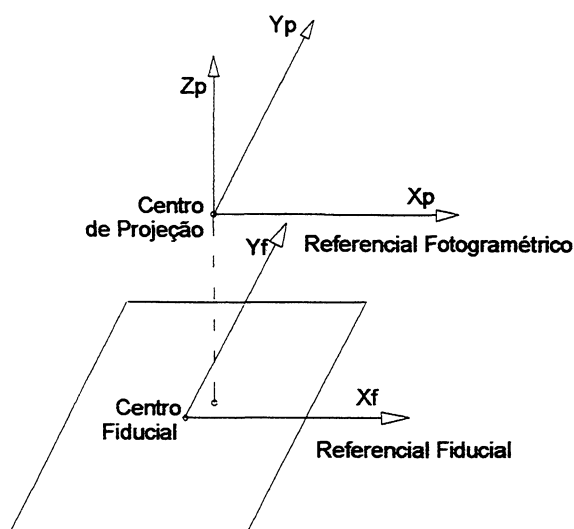
x e y = coordenadas no referencial instrumental;

a, b, c, d, x_0 e y_0 = parâmetros envolvidos no modelo afim geral empregado na transformação, entre os sistemas fiducial e instrumental;

Os parâmetros a, b, c, d representam diferentes escalas nos eixos x e y , não ortogonalidade dos eixos e rotação. Os parâmetros x_0 e y_0 são fatores de translação.

O referencial fotogramétrico tem sua origem no centro de perspectiva da foto, ou ponto principal. As coordenadas do ponto principal no referencial fiducial são fornecidas pelo certificado de calibração da câmara. O eixo X e Y são paralelos aos seus homônimos no referencial fiducial. O eixo Z é perpendicular ao plano do negativo orientado de maneira a formar um sistema dextrógiro e tridimensional. A mudança do referencial fiducial para o referencial fotogramétrico compreende uma translação, pois os dois sistemas são paralelos.

FIGURA 9 - REFERENCIAL FOTOGRAMÉTRICO



As coordenadas fotogramétricas contêm, ainda, erros sistemáticos devido à distorção das lentes da objetiva e da refração atmosférica. Estas deformações impedem a condição de colinearidade do ponto imagem, centro perspectivo e ponto objeto. Formulações matemáticas apresentadas por MERCHANT (1979), ANDRADE e OLIVAS (1981), MITISHITA (1997), permitem a correção destas deformações. Segundo MITISHITA (1997), para câmaras métricas, “na maioria dos trabalhos de monorrestituição verifica-se que a correção dos erros sistemáticos pode ser desprezada, pois a imprecisão altimétrica no modelamento matemático de superfície, acarreta uma parcela de erro muito maior nas coordenadas do ponto.”

2.6.2 Orientação Exterior de uma aerofoto no espaço

A orientação exterior consiste em determinar matematicamente as coordenadas do centro de projeção da câmara (X_0, Y_0, Z_0), assim como, os ângulos que definem a atitude (κ, ϕ, ω) de uma aerofoto no espaço, em relação ao referencial geodésico cartesiano local, MERCHANT (1979).

Admitindo-se que não haja mais deformações entre os referenciais fotogramétrico e geodésico local, pode-se considerar que as diferenças físicas entre eles são devidas a três rotações, três translações e um fator de escala. O modelo

matemático empregado para determinar os parâmetros requeridos na transformação exterior é a equação de colinearidade na sua forma direta, uma vez que foi restabelecida a condição de colinearidade entre os pontos, com o refinamento das coordenadas do sistema fotogramétrico com a aplicação das correções citadas no item 2.6.2. Desta forma, pode-se considerar que: o raio de luz se propaga em linha reta; o centro de projeção é um ponto; o centro de projeção, ponto objeto e o ponto imagem, estão sobre o mesmo raio de luz. Estas propriedades caracterizam a colinearidade entre estes pontos, o que possibilita as relações matemáticas entre as coordenadas do ponto da imagem (x, y, z) no referencial fotogramétrico, e as coordenadas do ponto objeto (x', y', z') no referencial fotogramétrico, permitindo, então, a formulação apresentada na equação 1.2. (LUGNANI, 1987; NOVAK, 1991)

$$\frac{x}{x'} = \frac{y}{y'} = \frac{z}{z'} \quad (1.2)$$

Desta equação originam-se duas equações linearmente independentes que são:

$$x = z \frac{x'}{z'} \quad (1.3)$$

$$y = z \frac{y'}{z'} \quad (1.4)$$

Nas câmaras fotogramétricas, z é constante para qualquer ponto imageado no negativo e o valor desta constante é igual à distância focal (c) da câmara. As equações podem ser expressas das seguintes formas:

$$x = c \frac{x'}{z'} \quad (1.5)$$

$$y = c \frac{y'}{z'} \quad (1.6)$$

As equações (1.5) e (1.6) estão ligadas ao referencial da foto, porém cada foto tem um referencial. Existe, então, a necessidade de se ter um único referencial e, na prática, é desejável que o ponto objeto esteja no referencial geodésico local. Como estes dois sistemas (foto e do terreno) não são paralelos, possuem escalas e origens diferentes, é necessário empregar-se uma transformação matemática que trate estas desigualdades. O modelo de similaridade ou isogonal no espaço pode solucionar, matematicamente, as diferenças físicas entre eles.

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \lambda' R(\kappa, \varphi, \omega) \begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix} \quad (1.7)$$

Onde:

λ = fator de escala,

ω, φ, κ , = ângulos de rotação dos eixos (x,y,z) no espaço,

X,Y,Z = coordenada do ponto no referencial geodésico local,

$R(\kappa, \varphi, \omega)$ = matriz de rotação no espaço,

X_0, Y_0, Z_0 = coordenadas da estação de exposição.

A matriz de rotação nos eixos $R(\kappa)$, $R(\varphi)$, $R(\omega)$ tem as configurações a seguir:

$$R(\omega) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & \sin \omega \\ 0 & -\sin \omega & \cos \omega \end{bmatrix} \quad (1.7a)$$

$$R(\varphi) = \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & -\sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (1.7b)$$

$$R(\kappa) = \begin{bmatrix} \cos \kappa & \sin \kappa & 0 \\ -\sin \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.7c)$$

$$M = R(\kappa).R(\varphi).R(\omega) = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \quad (1.7d)$$

M= matriz de rotação no espaço

Substituindo os valores de x' , y' e z' nas equações (1.5 e 1.6) têm-se as equações de colinearidade na sua forma direta:

$$\begin{aligned} x &= c \frac{m_{11}(X - X_0) + m_{12}(Y - Y_0) + m_{13}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} \\ y &= c \frac{m_{21}(X - X_0) + m_{22}(Y - Y_0) + m_{23}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} \end{aligned} \quad (1.8)$$

Estas equações são de suma importância na monorrestituição, pois elas constituem o modelo fundamental para o cálculo dos valores dos ângulos de rotação no espaço (κ, φ, ω) e das coordenadas (X_0, Y_0, Z_0) do centro de projeção da câmara no referencial do terreno, ou seja, os elementos da orientação exterior, pelo processo de resseção espacial.

A resseção espacial de uma aerofoto no sistema monorestituído, consiste na determinação dos parâmetros anteriormente citados, dadas as coordenadas de pontos no referencial do terreno e sua homóloga no referencial da imagem, a distância focal da câmara e a atribuição de valores aproximados aos parâmetros inicialmente, LUGNANI (1987).

Considerando-se que a resseção espacial emprega a equação de colinearidade na forma direta, calculando assim 6 parâmetros ($\omega, \varphi, \kappa, X_0, Y_0, Z_0$), três pontos de apoio, não alinhados, atendem à condição mínima para o cálculo, apresentando uma solução única na resolução do sistema de equações, pois seriam seis equações para seis incógnitas. A utilização de três pontos no cálculo dos parâmetros não apresenta um bom resultado, pois, em caso de erro em algum deles, o referencial materializado não é o desejado. Um número maior de pontos dá maior rigidez geométrica além de aumentar a qualidade dos resultados pois permite verificar a qualidade das

observações realizadas. Para LUGNANI (1987) uma solução numérica atraente, seria a adoção do modelo paramétrico com injunções. Para esta solução admitiram-se que os pontos observados no espaço objeto estavam isentos de erros, o que permitiram que as observações fossem agrupadas no primeiro membro da equação e os parâmetros no segundo membro. Assim:

$$L_a = F(X_a), \quad (1.9a)$$

Linearizando por Taylor tem-se o modelo:

$$V = AX + L \quad (1.9b)$$

Onde:

$$L = L_o - L_b \quad (1.9c)$$

$$L_o = F(X_0) \quad (1.9d)$$

$$X_a = X_0 + X \quad (1.9e)$$

$$X = -(A^T P A)^{-1} A^T P L \quad (1.9e)$$

Sendo:

L_b = Vetor dos valores observados;

X_0 = Vetor dos parâmetros aproximados;

X = Vetor das correções aos parâmetros aproximados;

X_a = Vetor dos parâmetros ajustados;

A = Matriz dos coeficientes das equações normais;

P = Matriz dos pesos das observações;

L_o = Vetor dos valores calculados na função com os valores aproximados.

2.6.3 Modelo matemático fundamental da monorrestituição

A equação de colinearidade da forma inversa - terminologia empregada por MITISHITA (1997), LUGNANI (1987) - é o modelo fundamental da monorrestituição, pois ela permite o relacionamento de pontos no espaço objeto com o seu homólogo, no espaço imagem. Ela transforma as coordenadas fotogramétricas (x,y) para o referencial cartesiano tridimensional local (X,Y,Z). A condição para a realização desta transformação é a existência de coordenada altimétrica do ponto no

referencial geodésico local e a definição dos parâmetros de orientação exterior anteriormente. MITISHITA (1997 p. 66) apresenta a dedução do modelo de colinearidade inverso e sua formulação é apresentada pela equação 2.0.

$$\begin{aligned} X &= X_0 + (Z - Z_0) \frac{m_{11}x + m_{21}y + m_{31}c}{m_{13}x + m_{23}y + m_{33}c} \\ Y &= Y_0 + (Z - Z_0) \frac{m_{12}x + m_{22}y + m_{32}c}{m_{13}x + m_{23}y + m_{33}c} \end{aligned} \quad (2.0)$$

2.6.4 Sistema Monorestituidor Digital

O Sistema Monorestituidor Digital trabalha sobre a plataforma de computação gráfica *Microstation PC*, associado a um gerenciador de imagens, *Descartes* ou *Iras/C*. Ele pode ser, portanto, subdividido em 2 subsistemas. O primeiro compreendido pelo programa de CAD, pelo gerenciador de imagem e pelas rotinas em MDL (*Microstation Development Language*). O segundo subsistema é composto pelo próprio Sistema de Monorrestituição Digital que processa, matematicamente, as informações adquiridas no primeiro.

As rotinas desenvolvidas em MDL, para o Monorestituidor, possibilitam a execução de observações fotogramétricas, nas aerofotos digitais. Estas observações são alvos tais como: as marcas fiduciais, necessárias à orientação interior analítica conforme item 2.6.1, os pontos fotogramétricos artificiais, os pontos pré-sinalizados e pontos fotoidentificáveis empregados na orientação exterior (vide item 2.6.2). Elas são ativadas e desativadas dentro do *Microstation* através do comando MDL *load e unload* e suas denominações são: fiducial, pontos, varre, modelo, edifica.

Trabalhando sobre a plataforma *Microstation*, o Monorestituidor aproveita as ferramentas gráficas deste programa, para que o operador possa executar a restituição das feições cartográficas, por meio da digitalização de tela. O sistema de gerenciamento de imagem, *Descartes* ou *Iras/C* permite a ampliação, a redução, o aumento e a diminuição do contraste da imagem.

O programa Monorestituidor é composto por 7 módulos e vários submódulos. Citam-se como módulos: Cadastro, Apoio, Orientação, Varredura, Aerotriangulação, Imagem e Retificação.

O módulo Cadastro permite ao operador cadastrar as informações da câmara, as precisões dos pontos fotogramétricos e pontos de apoio envolvidos no sistema, os parâmetros necessários ao modelamento matemático de superfícies, os parâmetros para a definição do sistema geodésico e do sistema de projeção do projeto e as informações necessárias à parametrização dos erros sistemáticos da imagem fotogramétrica. Estas tarefas estão subdivididas nos subsistemas, câmara, precisões, DTM, sistema geodésico e erros sistemáticos.

O módulo Apoio possibilita cadastrar os pontos de apoio com suas respectivas coordenadas (X,Y,Z).

O módulo Orientação permite a realização de orientações fotogramétricas necessárias à execução da monorrestituição e a varredura monoscópica de pontos. Submódulos permitem: selecionar e ativar os parâmetros geométricos da foto a ser monorestituída; determinar matematicamente os parâmetros de transformação entre os referenciais instrumentais, fiduciais e fotogramétricos; determinar matematicamente os parâmetros de transformação aproximada; determinar matematicamente os parâmetros de orientação exterior da fotografia a ser restituída; definir a área a ser monorestituída conforme a grade altimétrica dos pontos definidores do relevo. O SMD emprega para ajustar as observações na determinação dos parâmetros dos modelos matemáticos: transformação afim, projetiva, colinearidade direta, com ajustamento pelo modelo paramétrico com injunções de posição. Literatura a respeito do modelo paramétrico pode ser encontrada em GEMAEL 1994, ANDRADE (1979), ROSIER (1983), MITISHITA (1986) MITISHITA (1997), DALMOLIN (2002).

O módulo Retificação permite retificar o arquivo gráfico vetorial digitalizado, a partir da foto ou da imagem de satélite, em extensão DGN, com os modelos de orientação da foto ou com os modelos, Afim, projetivo, DLT (Transformação Linear Direta) e APM (Modelo Afim Paralelo), conforme definido pelo usuário.

O Sistema Monorestituidor Digital requer, como ambiente computacional, microcomputadores com capacidade de processar imagens, embora suas operações

matemáticas possam ser realizadas em máquinas bem mais simples. Segundo MITISHITA (1999), uma configuração ótimo seria um *Pentium II/400 Mhz*, Monitor de 20 polegadas e placa gráfica aceleradora de 8 a 16Mb, dois discos rígidos de 10 Gb e 128 MB de memória RAM.

2.7 PONTOS DE APOIO PARA AEROFOTOS SINGULARES E IMAGENS DE SATÉLITE

Os pontos de apoio são fundamentais em fotogrametria para a materialização do referencial do terreno. Para que as transformações matemáticas apresentem um bom resultado em seus cálculos, é essencial que os pontos da imagem com coordenadas conhecidas no terreno sejam bem definidos. A qualidade do trabalho vai depender desta etapa, pois segundo LILLESAND & KIEFER (1994) a acurácia dos pontos de controle é essencial para quase todas as operações fotogramétricas, porque as medidas fotogramétricas são tão confiáveis quanto os pontos de controle no qual eles são baseados.

Os pontos de apoio podem ser levantados, no terreno, com equipamentos geodésicos ou mesmo tirados de cartas em escala maior do que o original a ser atualizado. O princípio de que, em cartografia, não se deve ampliar mapas é também válido para o apoio retirado das cartas, já a redução diminui também os erros inerentes à captura e à escala da carta.

O estabelecimento de pontos de controle em fotogrametria pode ser realizado por meio de vôo apoiado. Este procedimento só é empregado em regiões de acesso difícil ou perigoso, ou mesmo em regiões com poucos pontos fotoidentificáveis. Este assunto pode ser encontrado em ANDRADE (1998).

Segundo ANDRADE (1998, p.128), “Os pontos de apoio são levantados de feições possíveis de serem identificadas nas fotos e que definam um ponto, tais como cantos de edificações, de cercas, de muros de jardins, de cruzamentos, etc.; ou em sinais colocados no terreno antes das aerofotos serem tomadas”.

A definição do número de pontos de apoio depende do modelo matemático a ser empregado, pois este determina o número de parâmetros agregados à transformação. A

distribuição destes pontos de apoio deve sempre abranger a área de trabalho como um todo, de maneira a não se privilegiar uma determinada região em detrimento da outra. A distribuição dos pontos de apoio para processos de restituição de fotos singulares procura obedecer às características de posição dos pontos fotogramétricos, ou seja, em áreas próximas aos pontos de *Von Grüber* (próximos aos pontos principais e extremidades das fotos, distantes uns dos outros por comprimento aproximadamente iguais). Esta técnica de distribuição dos pontos de apoio sobre a foto pode ser generalizada para as imagens digitais.

2.8 MODELO DIGITAL DE TERRENO

Modelo Digital de Terreno (DTM) são procedimentos que envolvem um conjunto de pontos da superfície real, com coordenadas espaciais (x,y,z) , em um determinado referencial, estruturas de dados e funções matemáticas de interpolação, com o objetivo de representar o comportamento da superfície real, OSTMAN⁴ citado por MITISHITA (1997).

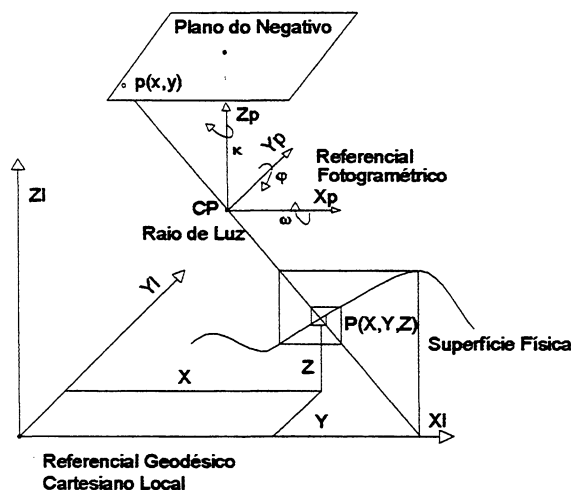
As funções matemáticas de interpolação têm como objetivo estimar valores onde não existem dados e são, principalmente, empregadas para calcular elevações para pontos de simples localização, gerar grades regulares a partir de dados coletados de forma irregular, densificar grades retangulares.

O modelo digital de terreno (DTM) desempenha um papel fundamental na fotogrametria digital, especialmente na monorrestituição, cujo modelo matemático de interpolação determina valores altimétricos para as coordenadas planas aproximadas no referencial do terreno, em um processo de iteração que emprega o modelo matemático de colinearidade na forma inversa, com a finalidade de determinar valores “exatos” para as coordenadas dos pontos no referencial do terreno, dentro de uma

⁴ OSTMAN, A. A Quality control and accuracy estimation of digital elevation models. In: Papers on digital elevation, Image Correlation and Map Maintenance. Sweden, 1987, The Royal Institute of Technology – Department of Photogrammetry.

precisão pré-definida. A figura 10 mostra o papel do DTM na monorrestituição digital, na retificação planimétrica proposta por MAKAROVICK (1973).

FIGURA 10 - DETERMINAÇÃO DA COORDENADA EXATA DO PONTO NO REFERENCIAL DO TERRENO PELO PROCESSO DE ITERAÇÃO



FONTE: MITISHITA (1997, P.124)

2.8.1 Entrada de Dados

De acordo com PETTINATI⁵ citado por MITISHITA (1997), em um DTM, o processo de modelamento matemático da superfície obedece a três etapas básicas de trabalho: obtenção de informações da superfície real que possibilitem a caracterização matemática do modelo; elaboração do modelo matemático composto por estruturas de dados e funções de interpolação que simulem o comportamento da superfície real e a aplicação do modelo em substituição à superfície real.

A escolha da fonte de dados e as técnicas de amostragem são críticas para a qualidade do resultado. PORTUGAL et al.(1999 p.23) afirmam que “a aquisição de dados é a atividade fundamental para a posterior representação precisa do relevo.” E mais ainda, consideram a aquisição de dados como um embrião do DTM que influencia diretamente na qualidade de sua modelagem e sua aplicação.

⁵ PETTINATI, F. **Modelamento digital e representação gráfica de superfícies**. São Paulo, 1983. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – USP.

Existem diferentes modos de obtenção de dados para o modelamento digital do terreno. A técnica a ser usada depende da configuração da área a ser trabalhada, da precisão desejada e da aplicação. Alguns autores, tais como, BAETA (1999) e WEIBEL & HELLER (1991) consideram que os dados são derivados de três fontes alternativas: levantamentos de campo, captura de dados fotogramétricos ou dados cartográficos digitalizados e citam outros métodos ocasionalmente usados como o radar, sonar ou altímetros a laser.

Os dados podem ser considerados como amostragens primárias e secundárias, de acordo com suas fontes. Os dados provenientes de levantamentos diretos de campo e restituição fotogramétrica são considerados primários, já os oriundos de mapas existentes são os secundários. Nas amostragens primárias de levantamentos diretos de campo, as informações referentes ao relevo são representadas por pontos que obedecem ao critério de representatividade da topografia da superfície real, levando em conta as depressões, elevações, as linhas de crista, talvegues, estradas e áreas construídas ou mesmo em forma de perfis. Este procedimento de entrada de dados é aplicado em projetos específicos e para complementar a captura fotogramétrica em regiões arborizadas. A amostragem primária de restituição fotogramétrica é baseada na interpretação de aerofotos ou de imagens de satélite, por meio de equipamentos fotogramétricos analógicos, analíticos ou digitais.

A disposição dos tipos de amostragens dentro do sistema fotogramétrico varia de autor para autor. WEIBEL & HELLER (1991 p.270), classificam a amostra em: padrão de amostra regular por perfil e grade (malha retangular e malha quadrada respectivamente), amostra progressiva, amostra seletiva, amostra composta e por correlação de imagens digitais estéreo-fotogramétricas para extração automática do DTM.

A amostra progressiva foi desenvolvida por MAKAROVIK (1973) inicia-se com uma grade de baixa quantidade de pontos em seguida avalia-se a sua acurácia e acrescentam-se novos pontos a ela conforme a complexidade do terreno de maneira a alcançar o nível de precisão exigido.

A amostra seletiva é empregada para capturar dados em terreno de descontinuidade acentuada, onde há necessidade de se definir as quebras topográficas. A amostra composta é a combinação da amostra progressiva com a seletiva. O método seletivo é empregado para coletar mudanças topográficas abruptas, enquanto o método progressivo captura informações sobre o restante do terreno. Assim o refinamento recursivo do processo progressivo pode ser minimizado e as descontinuidades do terreno são representadas com precisão.

Outra técnica de captura de dados é a extração automática de modelos de terreno por correlação de imagens digitais estéreo. Esta correlação pode ser executada com instrumentos de correlação fotogramétricos ou com instrumentos computacionais, sem envolver qualquer equipamento fotogramétrico. Esta técnica digital associa janelas de elementos e feições correspondentes por correlação, de maneira a se obter as paralaxes e suas elevações derivadas.

Segundo WEIBEL & HELLER (1991), cada um destes métodos tende a minimizar os esforços de coleta de dados e, ao mesmo tempo, maximizar a precisão do DTM resultante.

MITISHITA (1997) classifica os perfis em: regulares, irregulares, de amostra de pontos independentes e amostragem com perfis irregulares e pontos independentes. Os perfis regulares são formados por pontos com espaçamentos em x e y pré-definidos, usualmente empregados na fotogrametria analítica, formando, portanto, uma malha regular (retangular ou quadrada). Os perfis irregulares possuem pontos com espaçamentos variados, obtidos de acordo com o tipo de terreno da região. Este perfil é empregado tanto na topografia quanto na aerofotogrametria.

A amostragem de pontos independentes procura acompanhar descontinuidade do relevo da área amostrada, observando pontos ao longo dos rios, picos, estradas, linhas de drenagem, etc. A amostragem, composta por perfis irregulares e pontos independentes, é considerada a forma mais eficiente de coleta de dados, pois associa a captura de pontos de acordo com a topografia da área com os pontos independentes, nas regiões de descontinuidade.

As amostragens dos autores WEIBEL & HELLER (1991) e MITISHITA (1997) são relacionadas entre si, possuindo somente denominações diferenciadas. Assim, a amostragem de padrão regular pode ser associada ao perfil regular. A amostragem progressiva associa-se ao perfil irregular. A seletiva relaciona-se aos pontos independentes e a composta (progressiva e seletiva) assemelha-se à amostragem composta por perfis irregulares e pontos independentes.

Dados cartográficos digitalizados são fontes de informação altimétrica para um DTM. Estes dados são considerados amostragens secundárias, pois se originam da digitalização manual ou digitalização matricial de mapas analógicos existentes. A vetorização das informações provenientes da digitalização matricial destes mapas pode ser automática, semi-automática e manual. As informações altimétricas são representadas por curvas de nível, pontos notáveis representados na carta (os mais elevados e os mais profundos de uma depressão) e, ainda, linhas de quebra (elementos hidrográficos, linhas de cortes e aterros).

Segundo WEIBEL & HELLER (1991), os problemas apresentados pela entrada de dados por mapas existentes em um DTM podem ser agrupados como:

- As informações altimétricas são representadas por linhas e os programas modeladores de superfície trabalham com pontos, o que impõe a necessidade de extração dos pontos formadores das entidades;
- Número excessivo de pontos ao longo das linhas de contorno e nenhum pontos na direção transversal a ela;
- Introdução de erros provenientes da construção do mapa e em sua transformação analógico-digital.

Apesar de todos estes problemas relacionados, esta fonte de entrada de dados é muito empregada na construção de DTM para uso em várias escalas, devido ao grande volume de mapas existentes WEIBEL & HELLER (1991).

2.8.2. Geração dos Modelos Digitais de Terreno

As diferentes entradas de dados fornecem um conjunto de elementos que devem ser organizados de maneira a se estabelecer relações topológicas entre eles e permitir

um melhor desempenho das funções de interpolação na representação da superfície do terreno.

Considera-se o DTM como uma descrição numérica da posição e forma da superfície do terreno, portanto um objeto matemático com funções capazes de fornecer, em cada ponto do seu domínio de definição, a altitude e as suas derivadas (declives, curvaturas, etc.), segundo CAMPOS (1994).

2.8.2.1 Estrutura dos dados para um DTM

Os dados de entrada de um DTM devem ser organizados interligando pontos amostrados de maneira a formar poliedros. Estes poliedros podem ser de faces regulares e irregulares. Segundo CAMPOS (1994), existem diferentes classes de poliedros de faces regulares - quadrada, retangular, triangular e hexagonal – e os de faces irregulares, sendo mais comum os triangulares. Segundo WEIBEL & HELLER (1991), a maioria dos modelos digitais de terreno obedecem a duas estruturas de dados: a grade retangular (neste modelo eles incluem a face quadrada) ou a triangular - TIN (*Triangulated Irregular Network*).

As grades retangulares organizam as altitudes dos pontos em forma de matriz, ficando implícito neste tipo de representação a sua posição. Esta disposição de dados assemelha-se à estrutura empregada para armazenamento de dados nos computadores digitais, o que facilita a manipulação das informações nas operações de modelagem digital de terreno, além de ocupar menor espaço de armazenamento. A sua desvantagem reside em: adaptar a grade regular à complexidade do relevo, o que exige um número excessivo de pontos para alcançar um determinado nível de precisão e para representar as características topográficas do relevo de maneira eficiente.

O espaçamento entre os elementos da grade, isto é a resolução em x ou y, deve levar em conta a precisão dos dados e o tempo empregado para a geração da grade. A geração de grades regulares, a partir de informações de mapas existentes, deve ser menor ou igual à menor distância entre duas curvas de nível com valores altimétricos diferentes, para se representar as complexidades do relevo. Quanto mais densa a grade,

maior o tempo de processamento dos dados e maior a precisão alcançada. Por outro lado, quanto menos densa a grade, menor o tempo de processamento e menor a precisão, devido à impossibilidade de se representar as formas complexas do relevo.

As células irregulares triangulares, como o próprio nome diz, são compostos por triângulos formados pelos pontos amostrados da superfície e que, portanto, se articulam pelos vértices. Este tipo de estrutura de dados permite que as características topográficas sejam facilmente incorporadas a ela, o que representa, de forma adequada, uma quantidade variável de pontos e as desigualdades do relevo. Uma quantidade menor de pontos é necessária para representar as complexidades do relevo em um determinado grau de precisão. A desvantagem desta estrutura está na relação topológica que tem que ser processada (exemplos: delimitação da região de interesse, formação dos triângulos) e expressamente registrada, o que a torna mais complexa e mais difícil de se manusear.

A escolha de uma ou outra estrutura de dados depende do tipo de trabalho a ser realizado e da precisão exigida por ele. Estas duas estruturas estão, normalmente, disponíveis nos sistemas de modelagem digital de terreno, cabendo ao usuário a escolha do método.

2.8.2.2 Interpolação

Segundo WEIBEL & HELLER (1991), na modelagem digital de terreno, a interpolação serve ao propósito de estimar elevações em regiões onde não há dados. As interpolações são, principalmente, usadas nas operações de: cálculo de elevações de pontos de localizações simples; cálculo das elevações de pontos formadores de uma grade retangular, quando os pontos originais são amostrados de forma não regular; cálculo da posição (x,y) de pontos ao longo das curvas de nível (em interpolação de contorno) e densificação de grades retangulares (chamada de reamostragem).

Baseando-se em LAM⁶, WEIBEL & HELLER (1991,), agrupam-se os pontos de interpolação dentro de métodos exatos e aproximados. As funções de interpolação e aproximação (métodos exatos e métodos aproximados respectivamente) diferem quanto à possibilidade da função passar ou se ajustar à superfície definida pelos pontos, em uma regra de aproximação escolhida. Estes métodos podem ser classificados quanto à faixa de influência dos pontos envolvidos como: global ou local.

O método global é aquele no qual todos os pontos amostrados na superfície são usados na interpolação de um ponto. Qualquer alteração (retirada, inclusão, ou modificação) nos pontos da amostra reflete por toda a região de interesse, com diferentes graus de influência, de acordo com a distância que estes se encontram do ponto a ser interpolado. No método local, o espaço de referência é subdividido em subespaços e para cada subespaço é definida uma função de interpolação. Qualquer alteração nos pontos influencia somente os pontos dentro do subespaço trabalhado. A dificuldade deste método está em se definir a vizinhança.

Segundo WEIBEL & HELLER (1991), algumas considerações sobre as características e as peculiaridades dos interpoladores do DTM de amostragens topográficas são relacionadas a seguir:

- Não há um melhor algoritmo de interpolação que é superior a todos os outros e apropriado para todos os aplicativos;
- A qualidade do DTM resultante é determinada pela distribuição e precisão das amostragens originais e da adequação do modelo de interpolação fundamental;
- Os critérios mais importantes para selecionar um método de interpolação são o grau de adaptabilidade da função de interpolação aos diversos tipos de terrenos e a quantidade de características estruturais que podem ser consideradas;

⁶ LAM, S. N. **Spacial Interpolation Methods: a review**. The American Cartographer 10, 1983. 2, p. 49, 129p.

- Algoritmos de interpolação aceitáveis precisam se adaptar às propriedades dos elementos dados (tipo, precisão, importância, etc) e à forma como eles estão distribuídos. Soluções satisfatórias existem para amostragens topográficas densas e relativamente bem selecionadas, mas, mesmo assim, existem casos críticos que apresentam problemas nesta adaptação. Um exemplo disso é a dificuldade do algoritmo em interpretar as finas estruturas de curvas de nível vizinhas (representações de talwegues) e estendê-las através das áreas entre as linhas;
- Outros critérios que podem influenciar a seleção de um método em particular são o grau de precisão desejado e o esforço computacional envolvido no processamento das amostras.

2.9 MODELOS MATEMÁTICOS DE CORREÇÕES GEOMÉTRICAS DE IMAGENS DIGITAIS

As transformações matemáticas empregadas para corrigir as deformações geométricas da imagem podem ser agrupadas em modelos matemáticos de sensores físicos e modelos generalizados. A construção de um modelo de sensor físico requer informações a respeito do sistema de imageamento e da geometria interna e externa sensor. Os modelos generalizados, porém, independem da plataforma e do tipo do sensor e, por isto, tem vasta aplicação no sensoriamento remoto, na correção de suas imagens, segundo TAO et. al. (2000).

Na categoria dos modelos generalizados, algumas transformações são apresentadas neste estudo. São eles: transformação projetiva no plano, transformação afim no plano, transformação linear direta (DLT) e transformação afim paralela (APM).

2.9.1 Transformação projetiva no plano

A transformação projetiva descreve a relação entre dois planos. Ela é definida por 8 parâmetros que podem ser determinados pelas coordenadas de 4 pontos no

referencial do terreno e pelas coordenadas de seus correspondentes na imagem. LUGNANI (1987), TAO et. al. (2000), MERCHANT (1979), WOLF (1983) e NOVAC (1991) descrevem esta transformação.

$$\begin{aligned} X &= \frac{a_1x + a_2y + a_3}{a_4x + a_5y + 1} \\ Y &= \frac{a_6x + a_7y + a_8}{a_4x + a_5y + 1} \end{aligned} \quad (2.1)$$

Onde:

(X,Y) = coordenadas de pontos no referencial do terreno;

(x,y) = coordenadas de pontos no referencial da imagem;

(a1,a2,a3,a4,a5,a6,a7,a8) = parâmetros de transformação.

2.9.2 Transformação Afim no Plano

O modelo matemático da transformação afim geral no plano - equação (2.2) - possui seis parâmetros de transformação (a,b,c,d,x0,y0), onde estão representados de forma implícita os fatores de variação de escala supostamente existentes entre eixos (x,y), o ângulo de rotação dos eixos e fatores de translação do sistema de eixos. Este modelo é a forma linear da equação (2.1), onde os parâmetros envolvidos na transformação estão explicitados. O modelo de transformação afim, com agrupamento dos parâmetros, encontra-se em LUGNANI (1987), MERCHANT (1979), WOLF (1983), NOVAC (1991).

$$\begin{aligned} X &= \lambda_x \cos \alpha x + \lambda_y \sin \alpha y + x_0 \\ Y &= -\lambda_x \sin(\alpha + \varepsilon)x + \lambda_y \cos(\alpha + \varepsilon)y + y_0 \end{aligned} \quad (2.2)$$

Onde:

$\lambda_x \lambda_y$ = fatores de escala nos eixos x e y;

ε = ângulo de não ortogonalidade entre os eixos do sistema principal (X,Y);

α = ângulo de rotação;

x_0, y_0 = parâmetros de translação dos eixos;

X, Y = coordenadas dos pontos no referencial do terreno;

x, y = coordenadas dos pontos no referencial da imagem.

Simplificando a operação por agrupamento dos fatores de deformação das escalas nos eixos, rotação, não ortogonalidade entre os eixos, têm-se as equações 2.2a:

$$\begin{aligned} X &= ax + by + x_0 \\ Y &= cx + dy + y_0 \end{aligned} \quad (2.2a)$$

Onde,

X e Y = coordenadas no referencial do terreno

x e y = coordenadas no referencial da imagem

x_0, y_0 = fatores de translação

a,b,c,d = parâmetros de transformação

2.9.3 Transformação Linear Direta (DLT)

A DLT foi introduzida por ABDEL – AZIZ & KARARA (1971) com a finalidade de se evitar a calibração de câmaras amadoras e usar as medidas de coordenadas diretamente em instrumentos comparadores no fechamento de faixa fotogramétrica. A DLT tem como base a equação de colinearidade e, portanto, os seus princípios de projeção perspectiva e colinearidade, são considerados.

Acrescentando-se à equação (1.8) os valores das coordenadas do ponto principal no referencial da imagem (x_p, y_p) e considerando-se que (x,y) são coordenadas fotogramétricas, têm-se as seguintes fórmulas:

$$x = x_p - c \frac{m_{11}(X - X_0) + m_{12}(Y - Y_0) + m_{13}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} \quad (2.3)$$

$$y = y_p - c \frac{m_{21}(X - X_0) + m_{22}(Y - Y_0) + m_{23}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)}$$

Considerando-se que existe uma distância focal para cada eixo (x,y), representadas por (cx,cy), têm-se as equações:

$$x = x_p - c_x \frac{m_{11}(X - X_0) + m_{12}(Y - Y_0) + m_{13}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} \quad (2.4)$$

$$y = y_p - c_y \frac{m_{21}(X - X_0) + m_{22}(Y - Y_0) + m_{23}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)}$$

As duas distâncias focais significam diferentes fatores de escalas (λ_x, λ_y) nos eixos (x,y), assim:

$$c_x = \frac{c}{\lambda_x} \quad \text{e} \quad c_y = \frac{c}{\lambda_y}$$

Reorganizando-se as equações 2.4 e 2.4a, têm-se:

$$x = x_p - \frac{c}{\lambda_x} \frac{m_{11}(X - X_0) + m_{12}(Y - Y_0) + m_{13}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} \quad (2.5)$$

$$y = y_p - \frac{c}{\lambda_y} \frac{m_{21}(X - X_0) + m_{22}(Y - Y_0) + m_{23}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)}$$

$$x = \frac{\lambda_x x_p [m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)] - c [m_{11}(X - X_0) + m_{12}(Y - Y_0) + m_{13}(Z - Z_0)]}{\lambda_x [m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)]} \quad (2.6)$$

$$y = \frac{\lambda_y y_p [m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)] - c [m_{21}(X - X_0) + m_{22}(Y - Y_0) + m_{23}(Z - Z_0)]}{\lambda_y [m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)]}$$

Organizando-se a equação (2.6) em função de (X-X0), (Y-Y0) e (Z-Z0) tem-se:

$$x = \frac{(X - X_0)(m_{31}x_p - \frac{c}{\lambda_x} m_{11}) + (Y - Y_0)(m_{32}x_p - \frac{c}{\lambda_x} m_{12}) + (Z - Z_0)(m_{33}x_p - \frac{c}{\lambda_x} m_{13})}{m_{31}X - m_{31}X_0 + m_{32}Y - m_{32}Y_0 + m_{33}Z - m_{33}Z_0} \quad (2.7)$$

$$y = \frac{(X - X_0)(m_{31}y_p - \frac{c}{\lambda_y}m_{21}) + (Y - Y_0)(m_{32}y_p - \frac{d}{\lambda_y}m_{22}) + (Z - Z_0)(m_{33}y_p - \frac{d}{\lambda_y}m_{23})}{m_{31}X - m_{31}X_0 + m_{32}Y - m_{32}Y_0 + m_{33}Z - m_{33}Z_0}$$

Agrupando-se os elementos da equação (2.7)

$$L = -(m_{31}X + m_{32}Y + m_{33}Z)$$

Dividindo-se o numerador e o denominador por L e reagrupando-os, têm-se os parâmetros L1 a L11:

$$L_1 = \frac{m_{31}x_p - c_x m_{11}}{L}$$

$$L_2 = \frac{m_{32}x_p - c_x m_{12}}{L}$$

$$L_3 = \frac{m_{33}x_p - c_x m_{13}}{L}$$

$$L_4 = \frac{x_p + c_x(m_{11}X_0 + m_{21}Y_0 + m_{31}Z_0)}{L}$$

$$L_5 = \frac{y_p m_{13} - c_y m_{12}}{L}$$

$$L_6 = \frac{y_p m_{23} - c_y m_{22}}{L}$$

$$L_7 = \frac{y_p m_{33} - c_y m_{32}}{L}$$

$$L_8 = \frac{y_p + c_y(m_{12}X_0 + m_{22}Y_0 + m_{32}Z_0)}{L}$$

$$L_9 = \frac{m_{13}}{L}$$

$$L_{10} = \frac{m_{23}}{L}$$

$$L_{11} = \frac{m_{33}}{L}$$

Desta forma, a equação final pode ser reescrita como:

$$\begin{aligned}
 x &= \frac{L_1X + L_2Y + L_3Z + L_4}{L_9X + L_{10}Y + L_{11}Z + 1} \\
 y &= \frac{L_5X + L_6Y + L_7Z + L_8}{L_9X + L_{10}Y + L_{11}Z + 1}
 \end{aligned}
 \tag{2.8}$$

Os parâmetros L1 a L11 são lineares e são funções dos parâmetros de orientação interior e exterior da imagem. Observando-se a equação de colinearidade, nota-se que esta possui 6 parâmetros de orientação exterior e a DLT possui 11 parâmetros, representados por $(x_p, y_p, c, \lambda_x, \lambda_y, \kappa, \lambda, \omega, X_0, Y_0, Z_0)$, que se referem às coordenadas do ponto principal no referencial fotogramétrico, distância focal da câmara, diferentes escalas nos eixos (x, y) da imagem e aos 6 parâmetros de orientação exterior da aerofoto respectivamente. TAO et. al. (2000), NOVAC (1991) e FRASER et al. (2002) apresentam este modelo.

Reordenando os elementos da equação (2.8) colocando no primeiro membro desta as coordenadas (X, Y) do referencial cartesiano geodésico local, tem-se:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = A^{-1}C
 \tag{2.9}$$

onde:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1 - xL_9 & L_2 - xL_{10} \\ L_5 - yL_9 & L_6 - yL_{10} \end{bmatrix}
 \tag{2.9a}$$

$$C = \begin{bmatrix} C_{11} \\ C_{21} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -Z(L_3 - xL_{11}) - L_4 + x \\ -Z(L_7 - yL_{11}) - L_8 + y \end{bmatrix}
 \tag{2.9b}$$

2.9.4 Modelo de Projeção Afim Paralela (APM) ou Projeção Paralela

LUGNANI (1987), baseando em propriedades matemáticas das equações projetiva e afim, afirma que se pode passar da transformação projetiva no espaço para

a transformação afim no espaço, pois o grupo projetivo apresenta maior generalidade do que o grupo afim. Escrevendo-se a equação projetiva no espaço:

$$\begin{aligned}x' &= \frac{a_1x + a_2y + a_3z + a_4}{a_{13}x + a_{14}y + a_{15}z + 1} \\y' &= \frac{a_5x + a_6y + a_7z + a_8}{a_{13}x + a_{14}y + a_{15}z + 1} \\z' &= \frac{a_9x + a_{10}y + a_{11}z + a_{12}}{a_{13}x + a_{14}y + a_{15}z + 1}\end{aligned}\tag{3.0}$$

transformando-se a equação 3.0 em projetiva com coordenadas homogêneas, fazendo-se, para isso, as relações:

$$\begin{aligned}x &= \frac{X}{w}; \\y &= \frac{Y}{w}\end{aligned}\tag{3.1a}$$

$$z = \frac{Z}{w}$$

e

$$\begin{aligned}x' &= \frac{X'}{w'} \\y' &= \frac{Y'}{w'} \\z' &= \frac{Z'}{w'}\end{aligned}\tag{3.1b}$$

Dadas pelas equações 3.1a e 3.1b que correspondem à substituição de escalares únicos por classes de equivalência, faz-se a substituição das mesmas em 3.0, o que resulta após algumas operações algébricas em:

$$X' = a_1X + a_2Y + a_3Z + a_4w$$

$$Y' = a_5X + a_6Y + a_7Z + a_8w \quad (3.2)$$

$$Z' = a_9X + a_{10}Y + a_{11}Z + a_{12}w$$

$$w' = a_{13}X + a_{14}Y + a_{15}Z + w$$

Fazendo-se $a_{13}=a_{14}=a_{15}=0$, e dividindo cada equação 3.2 por $w'=w$, realizando-se algumas operações algébricas, e utilizando-se as equações 3.1a e 3.1b para retornar ao sistema não homogêneo, tem-se a transformação afim no espaço:

$$x' = a_1x + a_2y + a_3z + a_4$$

$$y' = a_5x + a_6y + a_7z + a_8 \quad (3.2a)$$

$$z' = a_9x + a_{10}y + a_{11}z + a_{12}$$

Segundo LUGNANI (1987), a projeção afim paralela é uma degeneração da transformação afim no espaço (R3) e pode ser escrita com base na equação 3.3 representada na forma matricial por:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & A_2 & A_3 \\ A_5 & A_6 & A_7 \\ A_9 & A_{10} & A_{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} A_4 \\ A_8 \\ A_{12} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Onde:

$[x,y,z]^T$ = coordenadas dos pontos no espaço imagem;

$[X,Y,Z]^T$ = coordenadas dos pontos no espaço objeto;

$$\begin{bmatrix} A_1 & A_2 & A_3 \\ A_5 & A_6 & A_7 \\ A_9 & A_{10} & A_{11} \end{bmatrix} = M = \text{matriz dos parâmetros de transformação};$$

$[A_4, A_8, A_{12}]$ = elementos do vetor de translação.

No caso de transformação afim no espaço, a matriz dos parâmetros de transformação (M) não pode ser singular, porque as transformações afim formam estruturas de grupo e a transformação inversa de $R^3 \rightarrow R^3$ requer não singularidade da matriz.

Quando a matriz de transformação dos parâmetros (M) é singular (posto2), a relação a seguir é verdadeira:

$$A_9X + A_{10}Y + A_{11}Z + A_{12} = 0 \quad (3.3a)$$

Isto significa que as três equações são linearmente dependentes. A equação (3.4a) é a equação de um plano passando por um determinado lugar do sistema tridimensional. Neste caso, o ponto transformado $p(x,y,z)$ pertence ao plano (3.4a).

Admitindo-se que o plano que passa em um determinado lugar do sistema R3 seja o plano (x,y) (plano $z=0$), têm-se:

$$x = A_1X + A_2Y + A_3Z + A_4 \quad (3.4)$$

$$y = A_5X + A_6Y + A_7Z + A_8$$

$$z = 0$$

Considerando-se que a matriz M possui posto 2, a relação a seguir é verdadeira:

$$A_1 : A_2 : A_3 : A_4 \neq A_5 : A_6 : A_7 : A_8 \quad (3.4a)$$

As equações 3.4 e 3.4a representam as equações da projeção paralela, projetando o espaço R3 em R2. Esta projeção é um caso particular da projeção central, onde o centro de projeção foi deslocado para o infinito. O desenvolvimento deste modelo pode ser encontrado em ONO et al. (2000), FRASER et al. (2002), HATTORI et al. (2000) e LUGNANI (1987).

Escrevendo a equação (3.4a) considerando as coordenadas do referencial cartesiano geodésico local, tem-se:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & A_2 \\ A_5 & A_6 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} x - A_4 - A_3Z \\ y - A_8 - A_7Z \end{bmatrix} \quad (3.4b)$$

3.0 MATERIAIS E MÉTODOS

Descrevem-se, neste capítulo, os materiais empregados, assim como a metodologia desenvolvida para a atualização cartográfica de mapas municipais na escala de 1:25000 integrando imagens IKONOS, fotografia aérea na escala de 1:30000 e a técnica de monorrestituição digital.

3.1 MATERIAIS EMPREGADOS

O desenvolvimento da metodologia para a atualização cartográfica de mapas municipais utilizou os seguintes materiais: mapa municipal digital do município de Betim, na escala 1:25000, informações cartográficas digitais na escala de 1:2000, aerofotos na escala de 1:30000, imagem IKONOS da mesma área, equipamentos geodésicos para a determinação de coordenadas e ambiente computacional composto de computadores, periféricos e programas, de maneira a atender as necessidades apresentadas em cada etapa da metodologia de atualização cartográfica. As características da área de estudo e de cada material empregado são descritas nos itens a seguir.

3.1.1 Área de Estudo

A área de estudo pertence ao município de Betim, localizado na região metropolitana de Belo Horizonte, Minas Gerais. As coordenadas que limitam a área de estudo estão representadas na tabela 3.

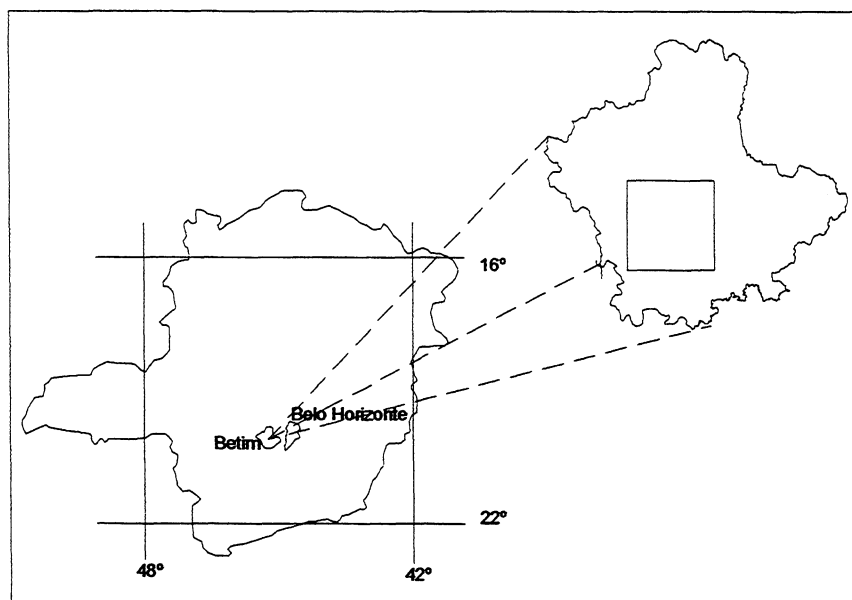
TABELA 3 - COORDENADAS DA ÁREA DE ESTUDO

Pontos Extremos	Coordenadas UTM		Coordenadas Geográficas	
	E (m)	N (m)	Longitude	Latitude
Superior Esquerdo	585161,240	7794518,660	-44° 11' 10,40"	-19° 56' 37,20"
Inferior direito	578607,320	7787500,000	-44° 14' 54,77"	-20° 00' 26,50"

A origem do sistema de coordenadas UTM é o meridiano de 45°W de Gr. e o Equador. O *datum* horizontal empregado é o de Córrego Alegre em Minas Gerais e o

vertical é o de Imbituba, Santa Catarina. Esta área está contida na folha da carta do Brasil, na escala de 1:25000, denominada BETIM e elaborada por um consórcio de empresas – Cruzeiro, Terrafoto, Prospec - em 1977. A altitude média da área de estudo é de 804 metros e a variação altimétrica é de 171 metros. A figura 11 apresenta o mapa de localização da área de estudo do município de Betim, do Estado de Minas Gerais.

FIGURA 11 - MAPA DE LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO DO MUNICÍPIO DE BETIM - MG



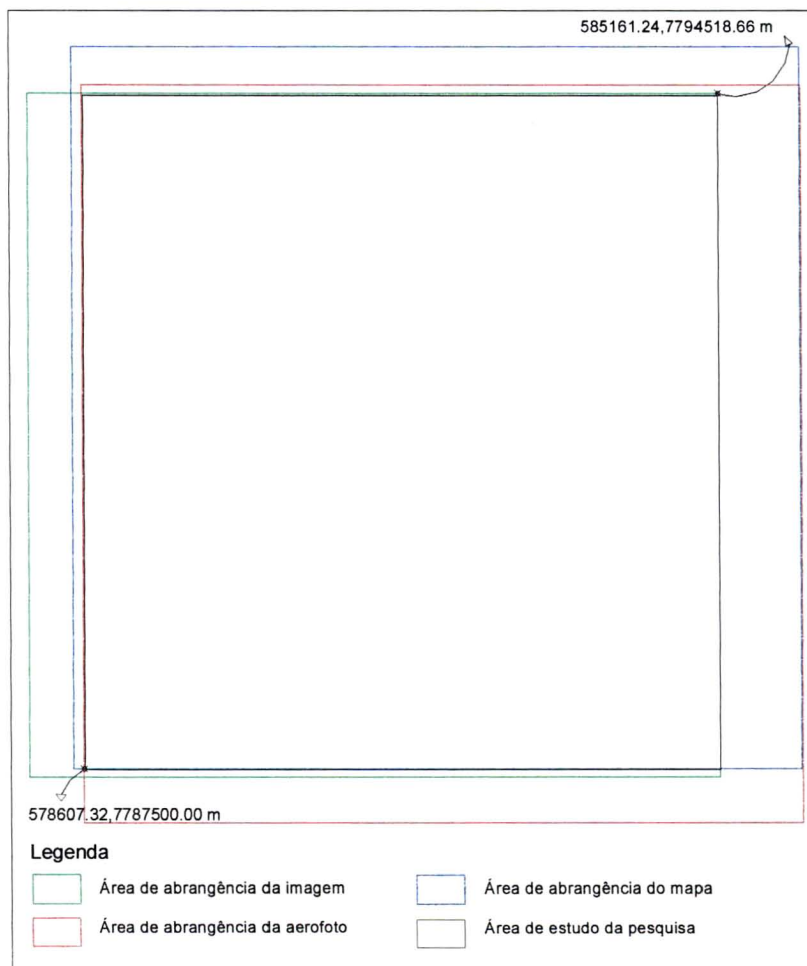
A escolha deste município como área de estudo deveu-se à existência e a disponibilidade de cartas e plantas na escala de 1:25000 e 1:2000, imagens IKONOS adquiridas em 2000, na forma *Pan Sharpening* (PSM) e fotografias aéreas na escala de 1:30000 de uma época intermediária entre a imagem e o mapa -1989 – assim como a sua facilidade de acesso por proximidade à capital mineira, Belo Horizonte, onde se situa a sede da Instituição Financiadora desta pesquisa.

O município de Betim vem investindo em geoprocessamento desde 1994 possuindo, portanto, um acervo completo de fotos, imagens e plantas na escala de 1:2000 de toda área do município o que veio contribuir para este estudo, uma vez que estes objetos podem ser usados como fontes de comparação para a avaliação da metodologia.

A integração das áreas de abrangência da imagem IKONOS, aerofoto e mapa delimitam a área de estudo, isto é, a área de interseção das referidas fontes de

informação. A figura 12 representa as áreas constantes nas três fontes de dados empregadas nesta metodologia, imagem, foto e mapa, apresentando as coordenadas finais da área de estudo.

FIGURA 1 - DELIMITAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO



3.1.2 Características das bases cartográficas

Esta pesquisa de atualização cartográfica empregou, como base, duas fontes de informação cartográfica: um mapa municipal digital na escala de 1:25000 e um mapa cadastral na escala de 1:2000, da área de estudo.

O mapa municipal digital foi elaborado a partir de informações cartográficas constantes na carta do mapeamento sistemático de Betim, na escala de 1:25000, possuindo, portanto, as mesmas características de projeção, datum e sistema de coordenadas do mapeamento que o originou. Este mapeamento sistemático teve como

base as aerofotos na escala de 1:40000, de aerolevantamentos executados em 1977 pelo consórcio Cruzeiro, Terrafoto, Prospec. A projeção deste mapeamento é a Projeção Transversa de Mercator (UTM), com a origem do sistema de coordenadas no Equador, com constantes adicionais para o Hemisfério Sul e meridiano central de 45° W. Gr. O datum horizontal é o Córrego Alegre-MG e o Vertical é o de Imbituba-SC. A equidistância das curvas de nível desta base é de 10m. As coordenadas da área do mapa digital de informações altimétricas e planimétricas do município de Betim estão representadas na tabela 4.

TABELA 4 - COORDENADAS DA ÁREA DO MAPA DIGITAL DO MUNICÍPIO DE BETIM

Pontos Extremos	Coordenadas UTM		Coordenadas Geográficas	
	E (m)	N (m)	Longitude	Latitude
Superior esquerdo	586000,00	7795000,00	-44° 10' 41,63"	-19° 56' 1,41"
Inferior Direito	578500,00	7787500,00	-44° 14' 58,46"	-20° 00' 6,51"

O mapa cadastral na escala de 1:2000 foi proveniente da restituição fotogramétrica analítica de fotos na escala de 1:8000. Sua projeção é a Transversa de Mercator (UTM) com a origem do sistema de coordenadas no Equador (para o Hemisfério Sul) e no meridiano central de 45° W. Gr. O *datum* horizontal é o Córrego Alegre - MG e o vertical é o de Imbituba - SC. A equidistância entre as curvas de nível é de 1m. Este mapa foi empregado como suporte ao desenvolvimento da metodologia.

3.1.3 Características geométricas da câmara

Tipo de Câmara: *Wild RC10*;

Tipo de cone: Universal – *Aviogon*;

Dimensão do quadro do negativo: 230x230mm;

Distância focal calibrada: 151,44 mm;

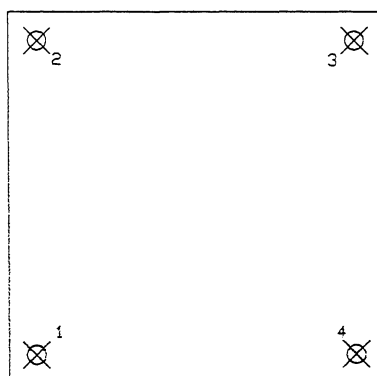
Número de marcas fiducias: 04;

Escala média da aerofoto: 1:30000.

As informações quanto às marcas fiduciais das aerofotos apresentadas no certificado de calibração da câmara *Wild RC10* se referiam às distâncias relacionadas entre elas, em unidade de milímetros, como demonstrado a seguir:

$$\begin{array}{ll} 1 - 2 = 211,989\text{mm}; & 4 - 1 = 212,003\text{mm}; \\ 2 - 3 = 212,000\text{mm}; & 1 - 3 = 299.812\text{mm}; \\ 3 - 4 = 212,000\text{mm}; & 2 - 4 = 299,809\text{mm}. \end{array}$$

FIGURA 13 - DISPOSIÇÃO DAS MARCAS FIDÚCIAS DA CÂMARA WILD RC10



As informações das distâncias permitiram calcular as coordenadas instrumentais das marcas fiduciais, por meio da fixação da origem do referencial em uma das marcas fiduciais (1), direcionamento do eixo x para a marca fiducial (4) e da definição do eixo y em direção perpendicular ao eixo x e formando entre si um sistema dextrógiro. Desta forma, determinaram-se as coordenadas das marcas fiduciais (1) com coordenada (0,0) e da marca (4) com (212,003;0). As coordenadas das marcas fiduciais (2) e (3) puderam ser definidas empregando-se as equações de distância relacionadas a estes pontos e observadas no certificado de calibração da câmara. O cálculo das coordenadas das demais marcas fiduciais foi realizado por ajustamento paramétrico. Literatura a respeito do ajustamento paramétrico pode ser encontrada em GEMAEL (1994), DALMOLIN (2002).

A origem do sistema fiducial, entretanto, deve ser a interseção entre as retas passantes por marcas fiduciais opostas. Por isso, um modelo matemático de interseção de retas foi empregado para calcular as coordenadas dos pontos de interseção, entre as marcas fiduciais, tendo como dados de entrada as coordenadas calculadas anteriormente. Transladou-se a origem do sistema inicial do ponto (1) para o ponto de

interseção entre as retas e recalcularam-se as coordenadas das marcas fiduciais no referencial fiducial.

Devido à ausência de informação sobre o ponto principal no certificado de calibração, consideraram-se idênticas as posições do ponto principal e do centro fiducial.

Os coeficientes polinomiais que aproximam a curva de distorção radial das lentes são, também, calculados a partir das distorções radiais conhecidas para determinados valores de distâncias apresentados no certificado de calibração da câmara, empregando o modelo de correção da distorção radial simétrica, conforme a equação 3.5, e os valores da tabela 3, ajustados pelo método paramétrico.

$$\Delta r = (k_1 r + k_2 r^3 + k_3 r^5 + k_4 r^7) \quad (3.5)$$

Onde:

Δr = distorção radial da lente para uma determinada distância do ponto principal;

r = é a distância radial da lente a partir do ponto principal fornecida pelo certificado de calibração da câmara e onde se conhecem as distorções radiais;

k_1, k_2, k_3, k_4 = coeficientes de um polinômio que aproxima a curva de distorção radial das lentes de uma câmara aérea;

TABELA 5 - VALORES DAS DISTORÇÕES RADIAIS SIMÉTRICAS EM FUNÇÃO DAS POSIÇÕES DA CÂMARA

Raio (mm)	20	40	60	80	100	120	140	148
Distorção (mm)	0,005	0,007	0,006	0,002	-0,004	-0,008	0,000	0,006

Os coeficientes calculados de distorção radial simétrica foram:

$$k_1 = -0.256048352033449 \text{ E-4mm};$$

$$k_2 = 4.98702056800953 \text{ E-8 mm}^{-3};$$

$$k_3 = -2.13645298222215 \text{ E-12 mm}^{-5};$$

$$k_4 = 1.38798528293226 \text{ E-17 mm}^{-7}.$$

As coordenadas UTM, com origem do sistema no meridiano central de 45°, constantes para o Hemisfério Sul e *datum* horizontal Córrego Alegre, que delimitam a

área da aerofoto na escala de 1:30000, estão apresentadas na tabela 6.

TABELA 6 - COORDENADAS APROXIMADAS DA ÁREA DA FOTOGRAFIA NA ESCALA DE 1:30000

Pontos Extremos	Coordenadas UTM		Coordenadas Geográficas	
	E (m)	N (m)	Longitude	Latitude
Superior esquerdo	586008,08	7794605,39	-44° 10' 41,29"	-19° 56' 34,24"
Inferior direito	578606,24	7786934,28	-44° 14' 54,72"	-20° 00' 44,90"

3.1.4 Informações geométricas e radiométrica da imagem IKONOS do município de Betim

O município de Betim possui um acervo de imagem de satélite cuja tomada ocorreu em duas datas diferentes, 11 e 22 de junho 2000, com coleções de elevação nominal distintas para as duas tomadas, 29,7° e 34,8°. Estas tomadas foram organizadas em vários arquivos de extensão GEOTIFF, cobrindo uma área aproximada de 350km². O produto comercial adquirido pela prefeitura é o CARTERRA Geo *Pan sharpened*, de correção geométrica padrão (vide item 2.5). Esta imagem é formada pela composição das bandas do espectro visível - azul, verde e vermelho - de maneira a formar uma composição colorida real.

Uma imagem de 7092x7092 *pixels* foi selecionada deste acervo, para o estudo, de maneira que a paisagem representada nesta imagem estivesse presente também na aerofoto na escala de 1:30000. Com base no arquivo de metadados fornecido pela empresa responsável pela comercialização destas imagens - *Space Imaging* - a imagem escolhida para estudo foi adquirida em 22/06/2000 com um ângulo de visada de 34,8°, azimuth de tomada 61,7°, ângulo de elevação solar 35,5° e resolução nominal no terreno de 1,14m no sentido transversal de varredura (*cross scan*) e 1,03m no sentido longitudinal (*along scan*). A imagem bruta (sem processamento algum) é configurada sobre uma grade, onde os pontos de interseção das linhas representam as posições dos *pixels* e cujos espaçamentos entre os pontos da grade é igual a um metro. A imagem IKONOS possui um ajuste geométrico inicial grosseiro para fins de comercialização. Esta imagem (no formato GEOTIFF) é georreferenciada empregando o algoritmo multiespectral de georreferenciamento projetivo e o método de interpolação bicúbico realizado pela *Space Imaging*. A projeção cartográfica utilizada para o

georreferenciamento da imagem foi a Universal Transversa de Mercator (UTM), para o fuso 23, no hemisfério Sul e *datum* WGS84.

A área da imagem está determinada, na tabela 7, pelas coordenadas do sistema de projeção UTM, *datum* Córrego Alegre, com origem do sistema no meridiano central de 45° e constantes para o Hemisfério Sul, conforme as demais fontes de dados da metodologia.

TABELA 7 - COORDENADAS APROXIMADAS DA ÁREA DA IMAGEM IKONOS

Pontos Extremos	Coordenadas UTM		Coordenadas Geográficas	
	E (m)	N (m)	Longitude	Latitude
Superior esquerdo	585161,24	7794518,66	-44° 11' 10,40"	-19° 56' 37,20"
Inferior direito	578043,30	7787415,98	-44° 15' 14,16"	-20° 00' 29,31"

3.1.5 Equipamentos, Microcomputador e periféricos

- Receptores geodésicos GPS – *Ashtech*;
- Microcomputador *Pentium III* - 700Htz, 128Mb de RAM, Placa de vídeo de 8Mb, disco rígido de 20Gb;
- Monitor de 17";
- Teclado;
- *Mouse*.

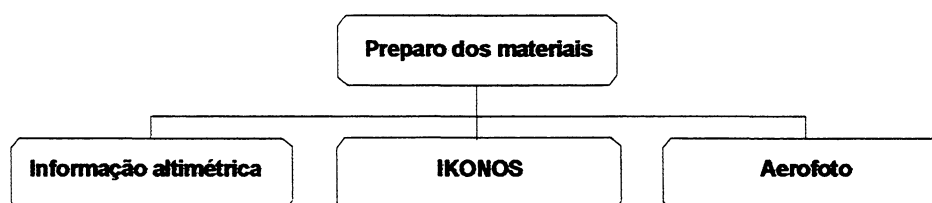
3.1.6 Programas

- *ENVI 3.4* - tratamento da imagem IKONOS;
- Sistema Monorestituidor Digital (SMD);
- *Microstation SE, Descartes* – Plataforma do SMD e gerenciador da imagem;
- *Golden Surfer 7.0*- Tratamento dos dados altimétricos;
- *Linecomp - GPPS – Ashtech Inc.* – Processamento dos dados de levantamento de campo;
- *Matlab* – Desenvolvimento de programas de suporte;
- *Toolmap* versão 1.02 da Trimbase na transformação das coordenadas do *datum* WGS-84 em coordenadas do *datum* Córrego Alegre.

3.1.7 Preparação dos materiais

As diferentes fontes de informação, utilizadas no desenvolvimento da metodologia de atualização cartográfica, integrando imagens de satélite de alta resolução e aerofotos por meio da técnica de monorrestituição digital requer tratamento das informações, de maneira a atender características das estruturas dos dados exigidas pelos programas comerciais empregados na pesquisa, assim como a transformação da aerofoto na forma analógica para o formato digital. A figura 14 representa, de forma esquemática, a preparação dos materiais detalhada nos itens 3.2.7.1, 3.2.7.2 e 3.2.7.3.

FIGURA 14 - ETAPAS EXECUTADAS NO PREPARO DOS MATERIAIS



3.1.7.1 Informação altimétrica

As bases altimétricas procedentes do mapa municipal em 1:25000 e da restituição fotogramétrica em 1:2000 foram representadas por pontos e polilinhas com informações referentes ao seu valor altimétrico e sua posição no sistema de coordenadas UTM. Este tipo organização de informação apresenta incompatibilidade com o tipo de estrutura de dados requerida pelo programa Sistema de Monorrestituição Digital. O algoritmo do SMD estabelece que os dados altimétricos sejam estruturados como uma grade regular ou irregular de pontos com coordenadas (x,y,z) em formato de intercâmbio de informação *ASCII*. A reestruturação dos dados de entrada requer o emprego de um modelo digital de terreno com funções de interpolação capazes de calcular as elevações dos pontos formadores da grade.

O programa modelador de superfície empregado nesta pesquisa foi o *SURFER 7.0* e a função de interpolação utilizada foi o método do inverso da distância de uma potência para a geração de uma grade regular (item 2.8.2.1), com espaçamento entre os

seus pontos, igual a 16.8m. O valor do espaçamento da grade foi definido em função do limite da área de trabalho determinada pelas coordenadas UTM 586000,7795000 (metros) e 578500m, 7785500 (metros) e pela condição imposta pelo algoritmo do SMD, que processa informações altimétricas de no máximo 200000 pontos. Desta forma, a grade foi construída com 447 linhas e 447 colunas, ou seja, 199809 pontos.

A escolha do modelo matemático - inverso da distância de uma potência - baseou-se no estudo de SARAIVA E MITISHITA (2001) para informações altimétricas representadas por polilinhas. O grande volume de pontos do arquivo de entrada (curvas de nível) determina o método de classificação local como o único método possível de ser utilizado no cálculo dos valores altimétricos da grade para a função de interpolação escolhida dentro do programa modelador de superfície *SURFER 7.0*.

Para a geração da grade utilizou como área de pesquisa uma circunferência de raio igual a 6280m. Esta circunferência foi subdividida em 4 setores e dentro de cada qual foi selecionado um número máximo de seis pontos e um mínimo de 5 pontos, mais próximos do ponto da grade, para a realização do cálculo. Desta forma, foi calculado, para cada setor, um ponto de média ponderada. A altitude final do ponto da grade é a média dos valores determinados para cada setor. O parâmetro de aproximação apresentado na equação (3.6a) teve seu valor determinado como zero, portanto, o método de interpolação empregado foi o exato. A potência determinada para o cálculo foi dois. Os dados foram ponderados durante a interpolação, de maneira tal que a influência de um ponto relativo ao outro declinou com o seu afastamento do nó da grade.

A equação matemática do modelo do inverso da distância de uma potência é:

$$Z_j = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{Z_i}{h_{ij}^\beta}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{h_{ij}^\beta}} \quad (3.6)$$

Sendo:

$$h_{ij} = \sqrt{d_{ij}^2 + \delta} \quad (3.6a)$$

Onde:

h_{ij} = distância efetiva de separação entre o nó da grade j e o ponto vizinho i ;

Z_j = valor interpolado para o nó da grade;

Z_i = pontos vizinhos;

d_{ij} = distância entre o nó da grade j e o seu ponto vizinho i ;

β = peso da potência;

δ = parâmetro de aproximação.

3.1.7.2 Imagens IKONOS

A preparação da imagem IKONOS consiste em reduzir a resolução radiométrica da imagem e do tamanho da cena. O processamento da imagem foi executado dentro do programa ENVI, versão 3.4. A redução na resolução radiométrica da imagem deve-se à limitação imposta pelo algoritmo do programa gerenciador de imagem, *Descartes* (versão utilizada nesta pesquisa), que reconhece somente 256 níveis digitais. Esta limitação de leitura (8bits) não permite a visualização das imagens IKONOS com sua resolução radiométrica plena, porque estas possuem resolução radiométrica de 11bits ou 2048 níveis digitais (vide item 2.5). Para compatibilizar a resolução radiométrica admitida pelo programa com a da imagem, diminuiu-se o número dos níveis digitais da imagem, empregando-se uma transformação linear de contraste.

A cena da imagem, composta de 12800 linhas por 7092 colunas, foi inicialmente reduzida para uma imagem de 7092 linhas por 7092 colunas. A redução no número de linhas foi necessária para que se pudesse trabalhar a imagem dentro da área da foto na escala de 1:30000.

3.1.7.3 Aerofotos

A preparação da aerofoto consiste em transformá-la da forma analógica para a digital. As fotografias aéreas analógicas foram convertidas para a forma digital (digitalização matricial) por meio de um scanner fotogramétrico, modelo RM1 do fabricante WEHRLI & ASSOCIATES INC., do tipo *Flatbed*, pertencente à Empresa

Aeroimagem Aerolevantamentos S.A. Este *scanner* possui características de: movimento de plataforma com sensor estacionário; dispositivo fotoelétrico formado por uma matriz CCD linear, com 2048 elementos; área de digitalização de 260x260mm; resolução geométrica de 12,5µm a 100µm; resolução radiométrica de 8bits; lâmpada fluorescente empregada como fonte de iluminação.

A resolução óptica empregada na varredura da aerofoto foi de 1000dpi (*dot pitch for inch*) o que resultou em um arquivo magnético com 92,7Mb e um *pixel* com aproximadamente 0,025mm de dimensão linear e resolução geométrica no terreno 0,75m uma vez que a escala média da fotografia é de 1:30000. A aerofoto digital originária desta conversão foi formada por 9984 linhas e 9728 colunas.

3.2 METODOLOGIA

A metodologia de atualização cartográfica para os mapas municipais na escala de 1:25000, desenvolvida nesta pesquisa, integrou ao mapa municipal, baseado em cartas do mapeamento sistemático de 1979, feições cartográficas adquiridas de: aerofotos, na escala de 1:30000, tomadas em 1989, imagens IKONOS coletadas em 2000, por meio da técnica de monorrestituição digital. As feições cartográficas, de interesse neste estudo, estão descritas no item 2.2.

A monorrestituição digital pode ser definida como um método matemático de determinação de coordenadas de pontos no espaço objeto por meio da relação geométrica de fotos singulares ou imagens digitais, utilizando-se pontos de apoio e um modelo matemático de terreno, o que permite o mapeamento planimétrico vetorial a partir da restituição monocular das imagens digitais.

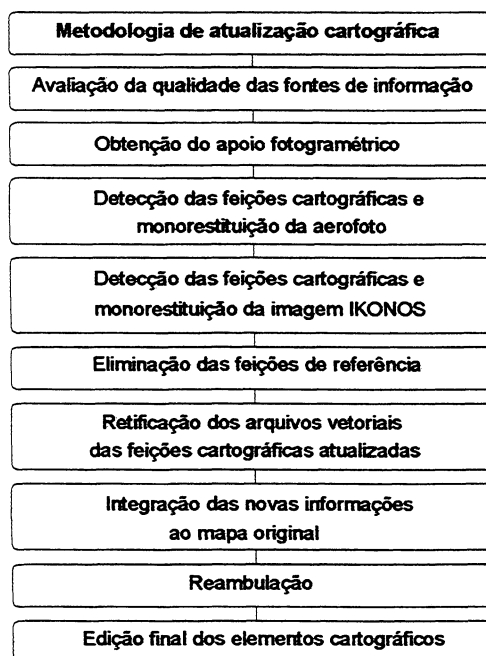
Esta pesquisa orientou-se pela necessidade de desenvolvimento de uma metodologia que mantivesse a precisão requerida para uma carta classe A, conforme determinado pelo Decreto número 89.817, publicado em junho de 1984, para um mapeamento na escala de 1:25000 cujo objetivo é servir de suporte ao planejamento das ações do governo local dentro da unidade administrativa do município.

A necessidade de uma atualização cartográfica foi determinada pelo emprego da imagem de satélite IKONOS, adquirida de acordo com a urgência da demanda

(contratação do serviço), para revisar os elementos específicos dos mapas municipais. Desta forma, a metodologia proposta caracteriza-se por ser uma revisão rápida e seletiva (vide item 2.1), pois se trata de uma revisão realizada sobre os elementos selecionados (considerados mais importantes para o mapa municipal) e com ocorrência determinada pela contratação do serviço.

Procurando atender ao imperativo de manutenção da qualidade do mapa original, executou-se inicialmente uma avaliação das diferentes fontes de informação disponíveis - mapa municipal na escala de 1:25000, carta na escala de 1:2000, imagem de satélite - para o desenvolvimento da metodologia de atualização cartográfica. Desta forma, a metodologia de atualização cartográfica foi subdividida em etapas dispostas na sequência de execução da pesquisa e esquematizada na figura 15. Os procedimentos em suas diferentes etapas da metodologia são descritos nos itens a seguir.

FIGURA 15 - METODOLOGIA DE ATUALIZAÇÃO CARTOGRÁFICA



3.2.1 Avaliação da qualidade do mapa municipal digital 1:25000, carta digital 1:2000 e imagem IKONOS GEO

Inicialmente, nesta pesquisa, considerou-se que o mapa municipal digital, na escala de 1:25000, estava dentro dos padrões de qualidade de uma carta classe A, uma vez que se pressupôs a adoção de controle de qualidade nos processos empregados para a sua construção - apoio, aerotriangulação, restituição, preparo para a impressão e conversão analógico digital. As discrepâncias entre as coordenadas dos pontos da base municipal na escala 1:25000 e da base de 1:2000, apresentadas no item 4.1, geraram dúvida sobre a qualidade dos dados disponíveis nas duas escalas. Devido a esta divergência entre as bases, tornou-se necessário coletar pontos em campo para averiguar a qualidade da base na escala 1:25000, pois esta é a principal fonte do mapa municipal.

A metodologia, para avaliar a qualidade do mapa municipal digital empregada nesta pesquisa, baseia-se na metodologia empregada por LEAL (1998) cujo objeto de estudo são as discrepâncias resultantes da combinação das componentes, Norte e Este, pois segundo ele: “a opção em se trabalhar com a resultante denota a preocupação em fazer uma análise que contemple a qualidade, aqui entendida como uma combinação de acurácia e precisão, diferentemente do exposto por GALO & CAMARGO (1994), onde se analisam os erros nas componentes e possibilita apenas a detecção de erros sistemáticos e não uma análise segura da qualidade.”

A média e o desvio padrão das discrepâncias foram obtidas por comparação entre as coordenadas plani-altimétricas de pontos coletados no campo e a sua homóloga, na carta digital. A utilização da média e desvio padrão, como parâmetros de avaliação, está vinculada à acurácia e à precisão, porque, segundo LEAL (1998), eles significam o afastamento que, como um todo, a carta teria da verdade topográfica e a dispersão dos valores observados, respectivamente.

A análise da média e desvio padrão foi associada ao Decreto de número 89.817 de 20 de junho de 1984, que estabelece classificações (A, B e C) segundo o Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) e o erro padrão. O PEC e o erro padrão foram definidos no referido Decreto como: “PEC é um indicador estatístico de dispersão, relativo a

90% de probabilidade, que define a exatidão de trabalhos cartográficos”, e erro padrão foi considerado equivalente às expressões desvio padrão e erro médio quadrático para efeito das instruções do mesmo.

A tabela 8, adaptada de LEAL (1998), resume os valores do PEC planimétrico e altimétrico de uma carta em 1:25000, com base nos valores estabelecidos pelo Decreto citado anteriormente.

TABELA 8 - PEC E ERRO PADRÃO ADMISSÍVEL NAS DIVERSAS CLASSES PARA A CARTA NA ESCALA DE 1:25000

Classes	PEC		Erro Padrão	
	Planimétrico (m)	Altimétrico (m)	Planimétrico (m)	Altimétrico (m)
A	12,5	5,0	7,5	3,3
B	20,0	6,0	12,5	4,0
C	25,0	7,5	15,0	5,0

FONTE: ADAPTADO DE LEAL (1998)

A primeira etapa do processo de avaliação da qualidade da carta consistiu em um teste de normalidade da distribuição da amostra uma vez que esta é uma amostra considerada pequena ($n < 30$).

O teste de normalidade escolhido foi o de FILLIBEN (1975), pois se adotou nesta pesquisa a metodologia desenvolvida por LEAL (1998) para a avaliação da qualidade da carta.

Este teste consistiu em calcular o coeficiente de correlação e compará-lo aos valores apresentados na tabela 9. Estes valores tabelados estão em função do número de pontos da amostra e do nível de confiança a ser utilizado no teste. A normalidade da distribuição se verificou quando o coeficiente calculado foi maior que o tabelado.

O coeficiente de correção foi dado pela equação:

$$r = \text{correl}(X_i, Z_i) = \frac{\left[n \cdot \sum_{i=1}^n (X \cdot Z) - \left(\sum_{i=1}^n X \right) \left(\sum_{i=1}^n Z \right) \right]}{\sqrt{\left[n \cdot \left(\sum_{i=1}^n X^2 \right) - \left(\sum_{i=1}^n X \right)^2 \right] \left[\left(\sum_{i=1}^n Z^2 \right) - \left(\sum_{i=1}^n Z \right)^2 \right]}} \quad (3.7)$$

Onde:

X = valores dos erros planimétricos ou altimétricos

Z = valores dos escores para a probabilidade acumulada calculada pela fórmula:

$$P(j) = \frac{\left(j - \frac{1}{2}\right)}{n} \quad (3.8)$$

sendo:

$P(j)$ = probabilidade acumulada;

j = posição ocupada pela observação (1,2,3...);

$\frac{1}{2}$ = correção de continuidade (aproximação de uma distribuição discreta por uma outra contínua).

TABELA 9 - PERCENT POINTS OF THE NORMAL PROBABILITY PLOT CORRELATION COEFFICIENT R

N	Nível de confiança													
	,000	,005	,01	,025	,05	,10	,25	,50	,75	,90	,95	,975	,99	,995
3	,866	,867	,869	,872	,879	,891	,924	,966	,991	,999	1,000	1,000	1,000	1,000
4	,784	,813	,822	,845	,868	,894	,931	,958	,979	,992	,996	,998	,999	1,000
5	,726	,803	,822	,855	,879	,902	,935	,960	,977	,988	,992	,995	,997	,998
6	,683	,818	,835	,868	,890	,911	,940	,962	,977	,986	,990	,993	,996	,997
7	,648	,828	,847	,876	,899	,916	,944	,965	,978	,986	,990	,992	,995	,996
8	,619	,841	,859	,886	,905	,924	,948	,967	,979	,986	,990	,992	,995	,996
9	,595	,851	,868	,893	,912	,929	,951	,968	,980	,987	,990	,992	,994	,995
10	,574	,860	,876	,900	,917	,934	,954	,970	,981	,987	,990	,992	,994	,995
...
15	,500	,894	,907	,925	,937	,950	0,965	,977	,984	,989	,991	,993	,994	,995
...
20	,452	,912	925	,939	,950	960	,972	,981	,987	,991	,992	,994	,995	,995
...

FONTE: ADAPTADO DE FILLIBEN (1975)

Para avaliar a acurácia foi aplicado a estimativa intervalar dada pela distribuição de Student que consiste em construir um intervalo de confiança de 90% de certeza para a média populacional a partir do conhecimento da média amostral e da variância.

Para analisar a precisão foi empregada a estimativa intervalar dada pela distribuição Qui Quadrado, em um intervalo de confiança de 90% para uma variância populacional a partir de uma variância amostral.

A determinação do valor da média e do desvio padrão foi realizada para as outras fontes de dados – carta 1:2000 e imagem IKONOS – com o intuito de verificar a possibilidade de utilização das informações cartográficas na escala de 1:2000, como

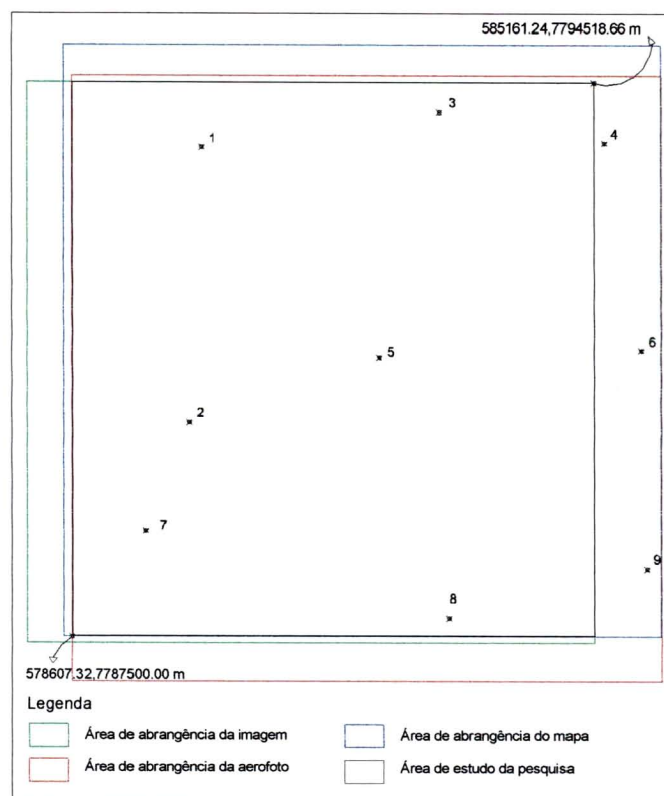
material de suporte e conhecer os valores médios dos erros dos produtos IKONOS GEO, uma vez que estes resíduos variam com as alterações de relevo e com o valor da elevação nominal do sensor para a aquisição da imagem.

O objetivo destas avaliações na pesquisa não é apurar os erros isoladamente e sim globalmente, considerando-se, assim, a precisão das fontes de dados quanto à magnitude dos erros cometidos e não em que fase eles ocorreram, em seu processo de formação.

O critério para a seleção dos pontos de verificação da qualidade da carta procurou obedecer a uma distribuição uniforme sobre a área de estudo e em número de pontos suficientes para que estes pudessem ser empregados também na realização do apoio fotogramétrico (9 pontos). Ver figura 16. A definição do número de pontos de apoio teve como base os procedimentos aerofotogramétricos de orientação de um modelo assim como, atender a necessidade dos diferentes modelos matemáticos utilizados nesta pesquisa na determinação de seus parâmetros empregando a técnica de ajustamento por mínimos quadrados.

Com o objetivo avaliar e, ao mesmo tempo, servir de apoio para a foto, alguns pontos foram selecionados, mapa e foto. Os alvos escolhidos foram os cruzamentos de ruas e estradas, porque estes entroncamentos são informações de fácil identificação em um mapa na escala de 1:25000 e ao mesmo tempo estão livres de obstruções, ou seja, distantes de objetos nas imediações, o que minimiza o efeito do multicaminho no levantamento com GPS e permite uma distribuição geométrica dos satélites, acima do horizonte, situação esta mais favorável para a recepção dos sinais. As descrições do procedimento de campo para a coleta dos pontos de verificação e apoio estão descritas no item 3.2.2.

FIGURA 16 - DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO



3.2.2 Obtenção do Apoio Fotogramétrico

O apoio fotogramétrico, como está descrito no item 2.7, pode ser obtido por levantamento de campo e por coleta de pontos em base cartográfica existente. Nesta pesquisa, as duas metodologias de apoio foram empregadas: o apoio com base em carta e o apoio de campo.

O procedimento de apoio de campo foi executado devido às discrepâncias existentes entre as duas bases cartográficas da área de estudo, uma na escala de 1:2000 pertencente à prefeitura de Betim e a outra em 1:25000 do mapeamento sistemático, como apresentado no item 4.1. Com o intuito de avaliar e apoiar o projeto, alguns pontos foram escolhidos segundo os critérios de: identificação dos pontos na carta, na aerofoto 1:30000, número mínimo de pontos igual a nove, distribuição uniforme destes pontos dentro da área de estudo, facilidade de acesso ao local do levantamento, áreas com pequena densidade de cobertura vegetal e áreas não alagadas ou pantanosas.

Nesta pesquisa, utilizou-se como ponto de apoio o entroncamento de rodovias e ruas, devido à necessidade de se avaliar a carta de 1:25000, uma vez que estas feições são fáceis de se identificar, tanto na carta 1:25000 quanto no campo.

A coleta dos pontos de campo contou com duas etapas: a preparação e a execução do apoio. A preparação do apoio, ou seja, o planejamento de escritório, determinou os pontos a serem levantados na carta de 1:25000 para avaliação, assim como os pontos que serviriam de apoio para a foto na escala de 1:30000. Os procedimentos preliminares de uma campanha GPS foram também executados de maneira a otimizar o trabalho de campo, pois, segundo CARVALHO (1999), torna-se indispensável o planejamento quando se almeja obter precisões nos levantamentos com um menor tempo de ocupação nos pontos.

O planejamento da campanha baseou-se nos seguintes procedimentos: análise de memória do receptor de maneira a permitir o levantamento sem descarga de dados no campo, verificação da quantidade de baterias necessárias ao tempo de rastreo planejado, verificação da disponibilidade dos satélites para o momento do rastreo, análise da geometria dos satélites para o local e para o tempo de duração do rastreo. Os demais procedimentos citados por CARVALHO (1999) foram realizados no campo, tais como, evitar áreas de obstrução e o acesso de transeuntes nas proximidades da antena na hora do levantamento, instalar corretamente a antena GPS sobre o ponto (centrada, nivelada e orientada para o norte) e medir a altura da antena em diferentes posições, adotando a média aritmética das medidas.

Estes nove pontos de verificação e apoio requeriam, não só informações planimétricas, como também altimétricas. Os valores altimétricos das cartas são referentes a altitude ortométrica. No entanto, as altitudes fornecidas pelo GPS são altitudes geométricas, referentes ao elipsóide WGS-84 (*World Geodetic System-84*) e a diferença entre a altitude ortométrica e a geométrica (respectivamente geóide e elipsóide) de um ponto na superfície é denominada ondulação geoidal. Uma das maneiras de se estimar os valores da ondulação geoidal de uma região é ocupar algumas RNs com GPS (no mínimo 3, pois estes definem um plano). As leituras obtidas com GPS para as coordenadas altimétricas são comparadas aos valores altimétricos das RNs e a diferença entre eles determina o valor da ondulação geoidal

local nas RNs ocupadas. A média aritmética entre as variações geoidais é calculada e com o seu valor pode-se transformar as coordenadas altimétricas geométricas dos pontos de verificação em coordenadas altimétricas ortométricas, que são as coordenadas das cartas do mapeamento sistemático.

Os trabalhos de campo foram realizados por três profissionais equipados com dois receptores GPS geodésicos *Ashtech* e empregou-se o método relativo de posicionamento com método estático clássico, para a determinação das coordenadas dos nove pontos escolhidos.

Devido à proximidade da área de estudo à estação de rastreamento contínuo da FEAMIG (Faculdade de Engenharia de Agrimensura de Minas Gerais) - 29,9km - optou-se por empregar as informações desta estação na realização do transporte de coordenadas para um marco de referência local. O tempo de ocupação do marco de referência foi de 4h consecutivas e o desvio padrão máximo das coordenadas (x,y,z) foi de 0,018m. Os demais pontos de verificação (9 pontos) foram observados por 40min em concomitância com o marco de referência, com taxa de coleta de dados de 20s, ângulo de elevação igual a 15° e as coordenadas dos pontos nove pontos foram determinadas com desvio padrão planimétrico máximo de 0,028m.

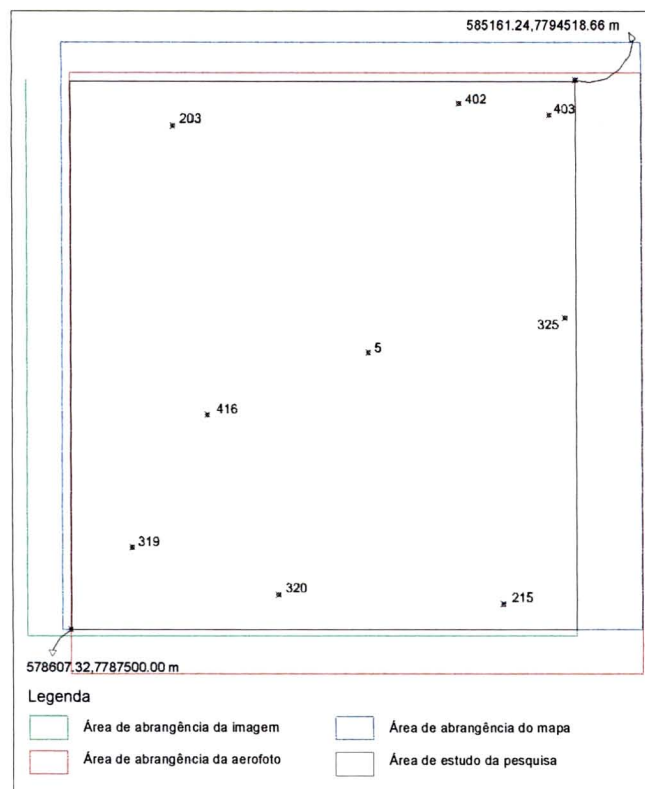
O programa utilizado no processamento dos dados foi GPPS 5.2.0 da *Ashtech* e o *Toolmap 1.02*, da Trimbase, para a transformação das coordenadas do *datum* WGS-84 em coordenadas do *datum* Córrego Alegre que emprega para realizar a transformação de datum a fórmula de Molodensk e os parâmetros determinados pelo IBGE, em concordância com a folha da carta do Brasil – Betim e a restituição fotogramétrica em 1:2000.

A coleta de pontos em base cartográfica existente foi outra forma de obtenção de pontos de apoio aplicada nesta metodologia. Pontos de apoio complementares foram adquiridos na carta na escala de 1:2000 do município de Betim em formato digital (DXF), uma vez que o resultado da avaliação da base 1:25000, quanto à sua acurácia e precisão (vide item 4.1) não a qualificou para fornecer pontos de apoio à pesquisa.

A escolha dos pontos de apoio na carta 1:2000 obedeceu ao critério de distribuição de pontos fotogramétricos adotado em aerofotogrametria (vide item 2.7),

por se tratar de apoio a uma foto singular. Nove pontos de diferentes feições foram seleccionados, entre elas: cantos de campo de futebol, cercas, muros e piscinas, cruzamento de ruas e esquinas de edificações cujas feições vizinhas apresentavam maior contraste nas imagens e cujos limites eram formas geométricas bem definidas.

FIGURA 17 - DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS DE APOIO DA CARTA 1:2000



3.2.3 Detecção e monorrestituição dos elementos de atualização da foto

A detecção das feições da superfície que foram modificadas no terreno foi executada pela comparação entre o mapa digital com a aerofoto. Para realizar esta comparação foi necessário sobrepor o mapa digital à foto. Considerando, entretanto, que a foto e o mapa possuíam sistemas de projeção diferentes (central e ortogonal, respectivamente), não foi possível realizar esta sobreposição diretamente. Nesta metodologia, o mapa digital estava referenciado ao sistema de projeção UTM com coordenadas UTM e a foto ao sistema de visualização de tela, denominado sistema referencial do plano gráfico. Um modelo matemático de transformação entre referenciais foi requerido para converter o mapa digital para o referencial da foto.

3.2.3.1 Transformação do mapa digital no referencial de projeção UTM para o referencial da foto

O objetivo desta etapa foi preparar um arquivo de referência com informações vetoriais do mapa base desatualizado, no mesmo sistema de projeção da foto, para a restituição das feições de atualização da imagem. A fim de alcançar tal meta, gerou-se uma cópia digital do mapa original e empregou-se, sobre ela, a transformação matemática afim (vide item 2.9.2), disponível no programa SMD. A utilização do modelo afim deve-se a exigência de um menor número de pontos de apoio a ser empregado do que o modelo projetivo e à hipótese de que as diferenças entre os referenciais do mapa e da foto envolvem escalas diferentes nos eixos, não ortogonalidade do eixo, rotação e translação. Os erros residuais resultantes desta transformação não foram considerados nesta operação, devido à finalidade de se gerar somente um arquivo vetorial de referência.

Esta etapa de transformação de referenciais pode ser executada em outros programas que estejam estruturados para executar retificações em dados vetoriais. Pode-se citar como exemplo de programa que possui esta possibilidade o *AutoCAD*. Entretanto, a sua execução dentro do programa SMD diminuiu custos operacionais da metodologia, no investimento em ambiente computacional.

Os pontos de apoio utilizados para a transformação de referenciais foram os adquiridos da carta em 1:2000, devido ao resultado da sua avaliação, apresentado no item 4.1. Estes pontos de apoio foram identificados, materializados e destacados no arquivo vetorial de referência, para facilitar as outras etapas de detecção de feições cartográficas.

As observações dos pontos fotogramétricos foram realizadas no sistema de computação gráfica *Microstation*, associado a seu gerenciador de imagem *Descartes* e armazenadas em um arquivo.

O arquivo de pontos de apoio é organizado com três campos distintos, destinados aos números dos pontos, coordenadas dos eixos (E,N) do sistema UTM e coordenadas altimétricas (z). A estruturação do arquivo de pontos fotogramétricos reserva campos para as coordenadas (I,J) do sistema referencial do plano gráfico.

Considerando-se que se quer obter um mapa com coordenadas fotogramétricas, as informações de entrada de dados - pontos de apoio e fotogramétricos - no SMD foram invertidas, isto é, as coordenadas UTM se tornaram coordenadas de pontos fotogramétricos (sem valor altimétrico) e as coordenadas do plano gráfico foram consideradas coordenadas de pontos de apoio com valor altimétrico igual a zero. O valor da altitude não tem influência neste modelo, pois se trata de uma transformação de referencial no plano - R2 (mapa para foto).

A retificação dos dados vetoriais do mapa ocorreu dentro do SMD que calculou os parâmetros da transformação afim, empregando o método dos mínimos quadrados com a técnica paramétrica com injeção de posição.

Com esta adaptação nos arquivos de entrada de dados do SMD foi possível realizar a transformação inversa (do referencial do mapa para o referencial da foto), requerida nesta fase da metodologia de atualização e, assim, se iniciar o processo de restituição das feições de atualização.

3.2.3.2 Detecção e restituição dos elementos de atualização da aerofoto

Realizada a transformação entre os referenciais do mapa e da foto, foi possível sobrepor o mapa à foto e se iniciar o processo de detecção e restituição das feições cartográficas atualizadas. A detecção dos elementos ocorreu por interpretação visual do operador, em um método de observação da foto realizado por quadrícula de coordenada.

As feições de atualização - estradas, ferrovias, edificações, arruamentos, etc - foram subdivididas em níveis de informação conforme a sua representação de cor, pois o mapa municipal (em estudo) se destina à impressão em papel. Assim os níveis de informação foram determinados em azul, sépia, vermelho, preto. As estradas de rodagem estão representadas no nível do vermelho, as estradas de ferro, a grade de coordenadas, os elementos pontuais - igrejas, escolas, fábricas, minas e marcas terrestres - as linhas de comunicação (telefônica e de energia elétrica) e os limites municipal e distrital são representadas em preto, os elementos hidrográficos são representados em azul e os elementos referentes ao relevo são representados em sépia.

Os elementos planimétricos da atualização foram acrescentados ao mapa, eliminados e modificados. Os elementos a serem acrescentados foram restituídos dentro da faixa de níveis criados para eles, sem, no entanto, realizar a edição dos mesmos, devido às restrições impostas pelo programa SMD. As características de linha destes elementos variaram conforme a legenda definida pelo manual do IGA para a construção dos mapas municipais. Os elementos do mapa a serem eliminados foram agrupados em um único nível, conservando, no entanto, suas características de cor e de linhas, visto que a extinção dos mesmos é dependente da constatação com os elementos da imagem. Os elementos a serem modificados foram reunidos em níveis próprios e representados conforme suas características de cor, forma e tipo de linhas, especificadas pelo manual de construção do mapa municipal do IGA. A tabela 10 esquematiza a organização das informações em seus níveis de informação, segundo a cor dos elementos a serem atualizados determinados pelo manual do IGA para mapas municipais, Anexo 2.

TABELA 10 - ORGANIZAÇÃO DAS INFORMAÇÕES DE ATUALIZAÇÃO EM NÍVEIS

Níveis digitais	Elementos de atualização	Níveis ocupados
De construção do mapa		1 a 8
Atualização da foto	Elementos acrescentados	9 a 17
	Modificados	18 a 26
	Eliminados	27

A detecção das feições cartográficas empregou o processo de interpretação clássica das aerofotos, realizada visualmente pelo operador baseado na tonalidade, textura, forma, tamanho, sombra e adjacências. Estes elementos da interpretação clássica podem ser sintetizados como:

- Tonalidade - A luz solar incide sobre os objetos e estes a refletem sob diferentes ângulos e intensidades, o que causa tonalidades diferentes entre as imagens da cena, permitindo, assim, a separação dos elementos;
- Tamanho - A superfície ou volume de um objeto em relação ao outro auxilia na identificação dos elementos;

- Textura - É a frequência de mudança de tonalidade dentro de uma imagem produzida por um agregado de componentes que isoladamente não são distinguidos na fotografia, devido ao seu pequeno tamanho;
- Forma - reconhecimento de formas dos objetos na imagem conduz a dedução (diferença entre estrada de ferro e rodovia);
- Sombra - Ocorre quando um objeto se interpõe e impede que os raios solares alcancem a área dele. A sombra pode delinear o perfil do objeto, ajudando a defini-lo ou escondê-lo devido à falta de luz;
- Adjacências - São elementos que nos permitem a identificação de outros (diferença entre duas áreas de plantio).

Trabalhando com a foto apresentada na tela, ou seja, restituindo-se sobre a tela, procedeu-se à captura das informações desatualizadas presentes na foto. O processo de digitalização adotado foi o “ponto a ponto” para caracterização dos elementos lineares sendo que o ponto representou as edificações rurais, escolas, igrejas, minas, indústrias e marcas terrestres, conforme símbolos pontuais desenvolvidos para os mapas municipais.

A edição dos elementos da digitalização ocorreu após a retificação do arquivo no SMD, pois este programa não identifica textos e elementos gráficos complexos (arcos, círculos, etc.).

3.2.4 Detecção e restituição das feições cartográficas complementares na imagem IKONOS

A detecção das feições cartográficas complementares da imagem IKONOS foi realizada pela comparação entre o arquivo referência – mapa original e feições atualizadas pela foto - e a imagem de satélite. O processo de sobreposição de feições cartográficas sobre a imagem foi empregado e novamente, uma transformação entre referenciais foi realizada sobre estas feições.

3.2.4.1 Transformação do mapa de feições cartográficas atualizadas para o referencial da imagem de satélite

A identificação dos pontos de apoio no arquivo vetorial permitiu as transformações entre os referenciais de maneira simples, como descrito no item 3.2.3.1.. O modelo matemático escolhido também foi o da transformação afim no plano com ajustamento paramétrico com injeção de posição (disponível no SMD). Os mesmos pontos de apoio e fotogramétricos foram empregados. As considerações feitas no item 3.2.3, quanto ao emprego da transformação afim no plano, são válidas para esta transformação de referencial. As alterações, com relação ao item 3.2.3 que ocorreram nesta etapa, referiram-se aos arquivos de entrada de dados - pontos fotogramétricos e pontos de apoio – que corresponderam às coordenadas dos pontos do mapa no referencial da foto e da imagem respectivamente, uma vez que se pretende transformar o arquivo vetorial do mapa no referencial da foto para o referencial da imagem.

3.2.4.2 Restituição complementar das feições cartográficas inexistentes no mapa e na foto constantes na imagem IKONOS

Transformadas as coordenadas do mapa no referencial da foto para o referencial da imagem sobrepôs-se o mapa à imagem IKONOS e iniciou-se o processo de detecção e restituição das feições cartográficas atuais. A detecção destes elementos foi realizada pelo processo de interpretação visual do operador, que observou a ocorrência de modificações por quadrícula de coordenada do mapa referência.

A restituição das feições cartográficas inexistentes no mapa e na foto foi realizada pelo operador, interpretando a refletância dos objetos associada às suas características de forma, textura, tamanho, sombra e adjacências, conforme descrito nos itens 2.4.2 e 3.2.3.2.. Novos níveis de informação foram definidos para conter os elementos de atualização da imagem, dentro da faixa previamente determinada, para os elementos que deveriam ser acrescentados, modificados e eliminados no arquivo original, conforme tabela 11. Mantiveram-se os padrões de cores e os tipos de linhas determinados para cada feição cartográfica, conforme o manual de construção do mapa

municipal do IGA. A tabela 11 determina os níveis de informação das feições de atualização cartográfica na metodologia de atualização cartográfica, integrando imagens IKONOS e aerofotos.

TABELA 11 - ORGANIZAÇÃO DAS INFORMAÇÕES DE ATUALIZAÇÃO EM NÍVEIS DE INFORMAÇÃO INTEGRANDO ELEMENTOS DA IMAGEM E DA FOTO

Níveis digitais	Elementos de atualização	Níveis ocupados
De construção do mapa		1 a 8
Atualização da foto	Elementos acrescentados	9 a 17
	Modificados	18 a 26
	Eliminados	27
Atualização da imagem	Elementos acrescentados	28 a 36
	Modificados	37 a 45
	Eliminados	46

3.2.5 Eliminação das informações de referência

A organização dos elementos de atualização cartográfica, em diferentes níveis, facilitou a eliminação das informações do arquivo referência, de maneira a minimizar o tempo necessário ao processamento nas operações de retificação das informações de atualização. A eliminação das informações de referência ocorreu tanto no arquivo da foto, quanto no arquivo da imagem, processados separadamente. As informações contidas nos níveis de número um ao número vinte e sete foram eliminadas antes de se realizar a retificação das informações vetoriais da imagem (arquivo original de atualização da imagem). As informações contidas nos níveis de número um ao nível de número oito foram eliminadas para processamento das informações vetoriais da foto (arquivo original de atualização da foto).

Esta metodologia gerou dois arquivos de atualização, imagem e foto, que foram processados separadamente e por modelos matemáticos distintos, devido à diferença existente nos sistemas de captura de dados e indisponibilidade das informações referentes ao sistema da imagem (vide itens 2.5 e 3.1.7.2).

As feições de atualização restituídas dentro dos intervalos de níveis de elementos a serem acrescentados, modificados e eliminados para a foto e para a imagem, foram determinadas para a retificação das informações vetoriais de atualização da imagem e da foto.

3.2.6 Retificação dos arquivos vetoriais das novas feições

A retificação das informações vetoriais no SMD foi executada empregando-se vários modelos matemáticos para a recuperação da posição e da atitude do avião nos pontos da imagem digital, segundo o referencial geodésico local. Tradicionalmente, a recuperação da posição e atitude do avião nas informações vetoriais digitalizadas, sobre uma aerofoto, utiliza a equação de colinearidade inversa e o modelo digital de superfície. Pode-se dizer, então que, as informações vetoriais, do arquivo da restituição de aerofotos foram ortorretificadas. Esta técnica, denominada de monorrestituição digital desenvolvida por MAKAROVICK (1973), está implementada em um programa nacional - Sistema de Monorrestituição Digital.

Em um sentido mais amplo, a técnica de monorrestituição digital pode ser definida como um procedimento matemático capaz de recuperar a posição e atitude de pontos da imagem digital, segundo um referencial geodésico local, o que permite obter um mapeamento planimétrico, a partir de informações vetoriais obtidas pela digitalização monocular de uma imagem digital. Este procedimento matemático é dependente da geometria de captura da imagem digital, podendo ser dividido em modelos matemáticos de correção da imagem de satélite e modelos de correção da aerofoto.

Devido à geometria de captura das imagens de satélite de alta resolução (vide item 2.5) e à indisponibilidade dos parâmetros de câmara, os modelos matemáticos de retificação da foto não puderam ser empregados na retificação da imagem de satélite. Outros modelos matemáticos presentes no SMD - afin e projetivo no plano e APM e DLT no espaço - que não necessitam de informações de câmara e atitude da plataforma espacial, foram aplicados na retificação da imagem de satélite. Assim, subdividiu-se este item em: retificação das informações vetoriais provenientes do arquivo da foto empregando a técnica de monorrestituição digital, e retificação das informações vetoriais do arquivo originário da imagem de satélite.

3.2.6.1 Retificação das informações vetoriais do arquivo proveniente da foto empregando a técnica de monorrestituição

Os modelos matemáticos de correção da foto são modelos capazes de recuperar a posição da fotografia em relação à câmara na hora de sua tomada (vide item 2.6.1), e de recuperar a posição e atitude de cada aerofoto, segundo um referencial do terreno (2.6.2) e (2.6.3). Dentro do SMD, a realização do procedimento de retificação do arquivo vetorial está vinculada à execução das orientações interior, espacial aproximada e exata da aerofoto e a determinação dos valores altimétricos dos pontos fotogramétricos, por processo de interpolação.

3.2.6.1.1 Orientação interior da foto

A reconstrução do feixe perspectivo que gerou a fotografia - orientação interior - é dependente dos parâmetros geométricos da câmara, fornecido pelo certificado de calibração da câmara e das observações das marcas fiduciais no referencial instrumental ou referencial do plano gráfico do programa *Microstation*. Nesta metodologia, empregaram-se os parâmetros de distância focal calibrada, coordenadas das marcas fiduciais, no referencial fiducial e distorção radial simétrica, conforme determinado no item 3.1.3. O modelo matemático de transformação afin foi utilizado porque a câmara especificada possuía quatro marcas fiduciais (conforme item 2.6.1.) e, portanto, admitiu-se que as deformações provenientes do filme estavam somente no domínio linear. O modelo matemático afin foi ajustado pela técnica dos mínimos quadrados e método paramétrico apresentado por LUGNANI (1987), GEMAEL (1994), DALMOLIN (2002), entre outros.

Uma análise dos erros residuais apresentados na determinação dos parâmetros de transformação pelo modelo adotado foi realizada para verificar se a precisão obtida estava dentro do esperado - meio *pixel* - conforme determinado por MITISHITA (1997) na parametrização das diferenças físicas existentes entre os referenciais.

3.2.6.1.2 Orientação aproximada

A segunda etapa da retificação da aerofoto recupera a posição e atitude da câmara com relação ao referencial geodésico local. Na técnica de monorrestituição digital este processo iniciou-se com a orientação espacial aproximada, que emprega uma equação projetiva (vide item 2.9.1) e a técnica de ajustamento paramétrico, para fornecer as coordenadas aproximadas no referencial geodésico local (X,Y) , de pontos do referencial fotogramétrico (x,y) , necessária à determinação de uma coordenada altimétrica (Z) , no modelo digital de terreno. Esta foi somente uma etapa intermediária da metodologia de monorrestituição digital do SMD, que visou fornecer dados iniciais aproximados para a determinação das coordenadas geodésicas planas locais “exatas” dos pontos fotogramétricos na retificação do arquivo vetorial, além de detectar a existência de erros grosseiros nos pontos de apoio.

Para a realização desta etapa foram fornecidas, ao programa SMD, as coordenadas UTM dos pontos de apoio determinados conforme item 3.2.3 e as coordenadas fotogramétricas homólogas no sistema de visualização de tela (ou referencial do plano gráfico). O SMD transforma as coordenadas UTM em coordenadas geodésicas cartesianas locais, vide MITISHITA (1997), e as coordenadas instrumentais do sistema de visualização de tela ou do referencial do plano gráfico em coordenadas fotogramétricas para a execução da orientação aproximada.

3.2.6.1.3 Orientação exterior da aerofoto

Na seqüência de procedimentos da técnica de monorrestituição digital veio a orientação exata, que consistiu na determinação dos parâmetros de orientação exterior $(\kappa,\varphi,\omega,X,Y,Z)$ da aerofoto, conforme item 2.6.2., com técnica de ajustamento paramétrico com injunção de posição, conforme MITISHITA (1997), GEMAEL (1994), MERCHANT (1979) e DALMOLIN (2002). A orientação exata empregou, como dados iniciais, as coordenadas dos pontos de apoio e as suas homólogas no sistema fotogramétrico.

Os erros residuais foram considerados, uma vez que nesta etapa se determinaram os parâmetros da câmara, a partir dos quais a retificação planimétrica foi realizada.

3.2.6.1.4 Varredura externa

A retificação do arquivo planimétrico dependeu da aquisição de coordenadas altimétricas para os pontos fotogramétricos do arquivo digitalizado. A obtenção da cota altimétrica, em posições não correspondentes aos pontos amostrados na grade, dentro do SMD, foi determinada por um modelo digital de terreno próprio do sistema, que utilizou em seu processamento as informações altimétricas organizadas em grades retangulares regulares, preparadas conforme descrito no item 3.1.6.1.. O procedimento de interpolação empregado no SMD foi o de superfície triangular plana, definido pela função de interpolação representada pela expressão (3.9), com o método de interpolação local (vide item 2.8.2.2). Este método trabalha sobre pontos altimétricos estruturados em triângulos ou em grades regulares, nos quais os pontos a serem interpolados devem-se encontrar no interior de algum triângulo. Este método apresenta bons resultados, quando aplicado em uma triangulação com pequeno espaçamento entre os pontos de controle.

$$Z_{(x,y)} = ax + by + d \quad (3.9)$$

onde:

a,b,d = coeficientes determinados pelas informações altimétricas e de posição dos pontos formadores do triângulo e vizinhos ao ponto sobre o qual se quer determinar a altimetria;

x,y = coordenadas dos pontos formadores do triângulo e do ponto de altimetria desconhecida;

$Z(x,y)$ = valor altimétrico dos pontos de coordenada (x,y).

3.2.6.1.5 Retificação do arquivo vetorial

A retificação do arquivo vetorial nada mais é que a transformação dos elementos digitalizados em um referencial do plano gráfico para o referencial UTM. Esta etapa envolve todas as informações obtidas nas fases 3.2.6.1.1 a 3.2.6.1.4. que podem ser descritas na sequência:

- Transformaram-se as coordenadas das feições digitalizadas que se encontravam no referencial do plano gráfico (instrumental), em coordenadas fiduciais empregando-se no cálculo os parâmetros determinados no item 3.2.6.1.1.;
- Transformaram-se as coordenadas fiduciais em coordenadas fotogramétricas, e corrigiu-se a distorção radial simétrica, empregando as informações do ponto principal e do coeficiente de distorção radial simétrica;
- Transformaram-se as coordenadas fotogramétricas em coordenadas geodésicas locais planas aproximadas, conforme descrito no item 3.2.6.1.2.;
- Determinou-se a coordenada altimétrica aproximada dos pontos formadores das feições cartográficas digitalizadas com as coordenadas geodésicas locais planas aproximadas, por meio do modelo digital de terreno, conforme item 3.2.6.1.4.;
- Determinaram-se as coordenadas geodésicas locais planas exatas dos elementos digitalizados (empregando os parâmetros determinados no item 3.2.6.1.3.), as coordenadas fotogramétricas, valor altimétrico gerado pelo DTM e o modelo de colinearidade inverso (vide item 2.6.2).

A determinação da coordenada geodésica local plana exata das feições digitalizadas requereu iteração no procedimento, pois se iniciou o processo com uma coordenada planialométrica aproximada. O processo de iteração só terminou quando a diferença entre duas iterações consecutivas estava dentro da precisão definida para o projeto.

O resultado final desta operação forneceu as coordenadas dos pontos digitalizados no sistema de geodésico cartesiano tridimensional local (XL,YL,ZL)

embora os mapeamentos digitais dos mapas municipais estejam ligados ao sistema de projeção UTM (Universal Transversa de Mercator). Por isso, necessitou-se de mais uma transformação de coordenadas. Esta transformação não ocorreu de forma direta, requerendo inicialmente uma transformação para o referencial geodésico cartesiano tridimensional com coordenadas (X,Y,Z) e destas para as coordenadas geodésicas elipsoidais (ϕ, λ, H), que puderam ser transformadas em coordenadas do sistema de projeção UTM. Detalhes sobre este processo de transformação podem ser encontrados em MITISHITA (1997), ANDRADE (1998), LUGNANI (1987).

3.2.6.2 Retificação do arquivo vetorial da imagem de satélite

A geometria de formação da imagem de alta resolução IKONOS (vide item 2.5) determina uma projeção perspectiva central unidimensional para os elementos da imagem no sentido transversal e uma projeção paralela no sentido longitudinal da cena enquanto que a aerofoto possui projeção central.

Devido à formação da imagem de satélite capturada por sensores CCD são requeridos modelos de sensores diferenciados da fotogrametria tradicional, para restituir o relacionamento entre o plano da imagem e o plano do terreno. TAO & HU (2000) citam, como modelo rígido de correção destas imagens, a equação de colinearidade baseada na retificação diferencial expressa nas equações 4.0, apresentada a seguir:

$$0 = -c \frac{a_{11j}(X - X_{0j}) + a_{12j}(Y - Y_{0j}) + a_{13j}(Z - Z_{0j})}{a_{31j}(X - X_{0j}) + a_{32j}(Y - Y_{0j}) + a_{33j}(Z - Z_{0j})}$$

$$y_j = -c \frac{a_{21j}(X - X_{0j}) + a_{22j}(Y - Y_{0j}) + a_{23j}(Z - Z_{0j})}{a_{31j}(X - X_{0j}) + a_{32j}(Y - Y_{0j}) + a_{33j}(Z - Z_{0j})}$$
(4.0)

onde:

o eixo x está direcionado para a linha de varredura;

X_{0j} , Y_{0j} , Z_{0j} = coordenadas do centro de projeção da linha j no referencial geodésico local;

y_j = coordenadas fotogramétricas correspondentes;

X, Y, Z = coordenadas cartesianas geodésicas locais.

No entanto, a aplicação da equação (4.0) para a correção geométrica da imagem requer o conhecimento dos parâmetros geométricos da câmara, no instante da captura da imagem, uma vez que a correção geométrica da imagem deve ser realizada linha a linha.

A indisponibilidade destas informações pela empresa fornecedora das imagens IKONOS impossibilitou a aplicação procedimento fotogramétrico de correção de uma aerofoto (equação de colinearidade) do SMD. Outros modelos disponíveis no SMD (transformação afim no plano e transformação projetiva) para a retificação dados vetoriais provenientes de imagens de satélite não corrigem as deformações provocadas pelo relevo. Dois modelos alternativos de transformação de referencial no espaço - DLT e APM - foram implementados, visando recuperar os parâmetros que aproximam a modelagem geométrica realizada pela equação de colinearidade, minimizando os efeitos das distorções geométricas descritas no item 2.2.3. A escolha do modelo adequado está diretamente vinculada à escala de trabalho, porque o valor do erro máximo admitido para o mapeamento varia com esta. Nesta pesquisa foram testados diferentes modelos matemáticos em 2D e 3D, de forma a embasar a escolha e aplicação na metodologia e apresentar um melhor resultado.

3.2.6.2.1 Transformação Projetiva no plano

A transformação projetiva no plano permitiu calcular analiticamente as coordenadas geodésicas planas locais (X, Y) das feições digitalizadas, considerando-se que estas foram projetadas sobre um plano não paralelo. Os pontos de apoio, selecionados conforme item (3.2.3), e os fotogramétricos correspondentes foram empregados nesta transformação. O modelo matemático desta transformação está descrito no item 2.9.1 e empregou as técnicas dos mínimos quadrados e ajustamento paramétrico com injeção de posição. No entanto, por ser uma transformação no plano, ela não corrigiu os erros provenientes do relevo.

3.2.6.2.2 Transformação Afim no Plano

Outro modelo de transformação entre referenciais no plano, empregado nesta pesquisa, foi a transformação afim. Esta transformação tem como propriedade e característica básica a preservação do paralelismo entre as retas representadas no espaço objeto e a imagem. Para realizar a transformação entre os referenciais do espaço objeto e imagem, empregaram-se as coordenadas de nove pontos de apoio, conforme distribuição apresentada no item 3.2.3. com as coordenadas de suas homólogas do espaço imagem. Apesar desta transformação matemática requerer somente três pontos para realizar o cálculo, em uma solução mínima foram utilizados 9 pontos de apoio ajustados pelo método dos mínimos quadrados e técnica paramétrico com injunção de posição. O modelo matemático desta transformação foi apresentado no item 2.9.2.. Da mesma forma que na transformação projetiva, esta transformação não corrigiu as deformações provocadas pelo relevo da região.

3.2.6.2.3 Transformação DLT

Conforme apresentado no item 2.9.3., a transformação DLT pode ser considerada como uma forma simplificada da equação de colinearidade, onde as coordenadas dos pontos observados num monocomparador podem ser transformadas diretamente para as coordenadas geodésicas. Este método foi desenvolvido por ABDEL-AZIZ & KARARA (1971) para calibrar a câmara não métrica. Esta transformação matemática permite eliminar a orientação interior e exterior, normalmente realizada pela aplicação da equação de colinearidade (vide item 2.9.3).

Para o cálculo dos parâmetros, utilizou-se a equação DLT na sua forma direta (equação 2.8 do item 2.9.3) e nove pontos de apoio. A determinação dos parâmetros nesta transformação requer, no mínimo, 6 pontos de apoio para se obter solução mínima. Portanto existe superabundância de informações que foram ajustadas pela técnica de ajustamento por mínimos quadrados, pelo método de ajustamento paramétrico com injunção de posição.

A retificação das feições cartográficas digitalizadas - pontos do referencial do plano gráfico – empregou a equação DLT na sua forma inversa (equação 2.9 do item

2.9.3), os parâmetros determinados anteriormente, um modelo digital de terreno, conforme item 3.2.6.1.4.

A grade altimétrica retangular regular, fornecida como entrada de dados, com coordenadas (X,Y,Z) do terreno foram transformadas para o referencial da imagem, pois os pontos definidores das feições cartográficas a serem retificados se encontram neste referencial. Desta forma, utilizando-se da equação DLT na sua forma direta (equação 2.8) as coordenadas (X,Y) dos pontos que descrevem o relevo no referencial do terreno são transformadas em coordenadas (x,y) do referencial da imagem. Assim a grade altimétrica que define o relevo da região foi composta de pontos com coordenadas (x,y,Z) ou seja, (x,y) coordenadas no referencial da imagem e (Z) coordenadas altimétricas do referencial do terreno.

3.2.6.2.4 Transformação Afim Paralela – APM

A transformação afim paralela, APM, projeta o espaço R^3 no plano R^2 e, portanto, ela relaciona as coordenadas geodésicas cartesianas locais (X,Y,Z) com coordenadas fotogramétricas (x,y) (vide item 2.9.4). Segundo ONO et. al. (2000), esta projeção é a mais adequada para a retificação das imagens de alta resolução com processo de varredura *push-broom*. Isto se deve a alta correlação entre os ângulos que definem a atitude do satélite, associada ao movimento suave do satélite ao longo de uma órbita Kepleriana no espaço, e à pequena área de cobertura da cena no terreno. Nestes termos, pode-se considerar que se o sistema de referência adotado for o *Gauss-Krüger*, os ângulos de orientação são aproximadamente constantes e a órbita do satélite aproximadamente reta. As principais características da equação de colinearidade podem ser simplificadas para propostas de mapeamentos de pequenas áreas. Esta simplificação considera a imagem como sendo de projeção paralela e o centro de projeção tendendo ao infinito.

Segundo FRASER (2000) a formulação do modelo APM foi motivada pelo reconhecimento de que o campo de visão (FOV) do sensor IKONOS é muito pequeno ($<1^\circ$) existindo, portanto, alta correlação entre os parâmetros de orientação exterior

dentro da projeção perspectiva, daí o feixe de raios se aproxima de uma projeção paralela.

O cálculo dos parâmetros utilizou a equação APM em sua forma direta (equação 3.1), a partir de nove pontos de apoio da carta em 1:2000, conforme apresentado no item 3.2.3., e os pontos fotogramétricos, ajustados pelo método dos mínimos quadrados e técnica de ajustamento paramétrico com injunção de posição.

A retificação do arquivo vetorial da imagem, que é a determinação das coordenadas UTM dos pontos digitalizados (coordenadas do plano gráfico) foi realizada, empregando-se os parâmetros calculados, um modelo digital de terreno (conforme item 3.2.6.1.4.) e a equação APM na sua forma inversa (equação 3.4b). Para realizar a determinação da coordenada altimétrica (Z), por DTM, conforme descrito no item 3.2.6.1.4, dos pontos definidores das feições a serem retificadas, foram transformadas as coordenadas da grade altimétrica no referencial do terreno, fornecida como entrada de dados, para o referencial da imagem. Utilizando-se da equação APM na sua forma direta (equação 3.4) as coordenadas (X, Y), dos pontos que descrevem o relevo no referencial do terreno, são transformadas em coordenadas (x, y) do referencial da imagem. Assim a grade altimétrica que define o relevo da região foi composta de pontos com coordenadas (x, y, Z) ou seja, (x, y) coordenadas no referencial da imagem e (Z) coordenadas altimétricas do referencial do terreno.

3.2.7 Integração das novas informações retificadas ao mapa municipal

A retificação das feições cartográficas do arquivo gráfico de atualização da aerofoto e da imagem IKONOS transformou-as para o mesmo sistema de projeção e de coordenadas (UTM). As feições vetoriais dos arquivos gráficos de atualização (imagem e foto) foram integradas ao mapa original por superposição de informação. Esta junção de informações gerou um mapa parcialmente atualizado. Parcialmente, porque se faltavam eliminar as feições cartográficas que já não existiam mais na paisagem terrestre e adicionar as informações da reambulação.

A eliminação destas feições foi realizada sobre o mapa parcialmente atualizado, nas áreas delimitadas pelos polígonos de eliminação de feições, conforme especificado no item 3.2.5..

3.2.9 Reambulação

A reambulação é um processo de coleta de topônimos dados e informações sobre as feições cartográficas do mapa atualizado. Executou-se a reambulação, conforme descrito no item 2.3., após a integração das novas feições cartográficas ao mapa original. A eliminação, ou mesmo acréscimo, de feições cartográficas detectadas pelo reambulador são anotadas sobre a foto, imagem ou mapa. Os três materiais fizeram parte da documentação de campo, ficando à critério do reambulador definir em qual das três fontes estão as feições que foram modificadas. As feições demarcadas ou identificadas na reambulação foram eliminadas no mapa atualizado, quando a realidade não era a que está representada no mapa atualizado e, no caso de acréscimo de novas feições a este, avaliava-se em qual fonte (foto e imagem) esta feição está melhor representada para a realização de sua posterior digitalização. Estas novas feições foram digitalizadas em um arquivo de dados, criado para conter as informações de campo, respeitando os níveis já existentes no arquivo vetorial da imagem e da foto e as especificações dos tipos de linhas e cores determinadas para cada feição. Estas feições foram retificadas, conforme item 3.2.8.1 (caso da foto) e item 3.2.8.2 (caso da imagem), e integradas ao mapa original atualizado. Este acréscimo de feições ocorreu devido à seleção dos elementos pontuais que foram feitas no processo de atualização com imagem e foto, onde nem todas as edificações rurais foram representadas, por não ser o mapa municipal um cadastro de propriedades rurais.

As informações textuais ou de nomenclatura foram integradas às outras informações do mapa, no momento da edição dos elementos cartográficos.

3.2.10 Edição dos elementos cartográficos

A atualização das feições cartográficas foi complementada com o trabalho de campo, restando, somente a edição dos elementos do mapa atualizado.

A fase final desta metodologia empregou uma revisão rigorosa nos elementos cartográficos das atualizações para eliminar as falhas de polígonos abertos, descontinuidade de linhas e simbologias impróprias dos mapas municipais, além da construção da legenda, de acabamentos curvilíneos e da colocação dos textos da nomenclatura em posições adequadas.

4.0 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados da avaliação planimétrica e altimétrica do mapa digital original na escala 1:25000, assim como as avaliações sobre a base cartográfica em 1:2000 e a imagem IKONOS padrão GEO, do município de Betim. Os resultados obtidos no emprego de diversos modelos matemáticos, para a correção geométrica dos elementos vetoriais oriundos da foto e da imagem IKONOS, no desenvolvimento da metodologia de atualização cartográfica, assim como os produtos provenientes da própria metodologia, as duas minutas de atualização (imagem e foto), são divulgados neste capítulo.

Discutem-se os resultados alcançados com estas transformações nos pontos de modelagem, nos pontos de verificação coletados aleatoriamente e nas diferentes entidades capturadas dos arquivos vetoriais retificados. Analisaram-se também, a interpretação da imagem, o tempo de execução e o custo da aplicação da metodologia avaliando assim, sua viabilidade prática e operacional.

4.1 AVALIAÇÃO DO MATERIAL EMPREGADO NA ATUALIZAÇÃO CARTOGRÁFICA - MAPA MUNICIPAL ORIGINAL NA ESCALA 1:25000, BASE CARTOGRÁFICA NA ESCALA DE 1:2000, IMAGEM IKONOS PADRÃO GEO

Procurando atender à exigência de manter a mesma qualidade da carta original após a sua atualização, verificou-se a qualidade da carta base e de outras fontes de informação, disponíveis para o processo de atualização, (vide item 2.1).

Para isto foram comparados, inicialmente, os valores das coordenadas planimétricas dos pontos de apoio selecionados na carta, na escala em 1:2000, e seus homólogos no mapa digital, na escala de 1:25000, conforme descrito no item 3.2.1. O resultado desta comparação está representado na tabela 12.

TABELA 12 - COMPARAÇÃO ENTRE OS PONTOS DA CARTA NA ESCALA DE 1:2000 E 1:25000

Pontos	Carta digital 1:2000		Mapa digital 1:25000		ΔE (m)	ΔN (m)	ΔR (m)
	E (m)	N (m)	E (m)	N (m)			
1	580232,871	7793703,303	580219,607	7793693,146	13,264	10,157	16,707
2	580072,349	7790213,476	580139,879	7790237,520	-67,530	-24,044	71,684
3	585291,987	7793752,609	585285,554	7793754,804	6,433	-2,195	6,797
4	583225,369	7794144,465	583224,32	7794165,081	1,049	-20,616	20,646
5	582468,597	7791039,415	582471,392	7791026,841	-2,795	12,573	12,880
6	585755,736	7791130,138	585732,887	7791104,221	22,849	25,917	34,551
7	579525,086	7788822,459	579537,197	7788834,688	-12,111	-12,229	17,211
9	585826,717	7788342,709	585825,044	7788317,048	1,673	25,660	25,715
Média					-4,646	1,903	25,773
Desvio Padrão					27,478	19,712	20,329

Analisando os valores das discrepâncias resultantes (ΔR), da média e desvio padrão, representados na coluna oito da tabela 12, verificou-se que estes são superiores aos valores da média e desvio padrão, admitidos como PEC e erro padrão, pela Decreto 89817 de 20 de junho de 1984, para um mapa na escala de 1:25000, representados na tabela 8. Surgiu então a dúvida, em qual destas bases disponíveis encontrar-se-ia o erro planimétrico.

Os altos valores das discrepâncias mostradas na tabela 12 geraram desconfiança com relação à qualidade das bases cartográficas disponíveis para o desenvolvimento da metodologia. Por esta razão, decidiu-se realizar uma coleta de coordenadas planialtimétricas de pontos no campo, de modo a se ter subsídios para a avaliação da qualidade dos mapas bases e identificar qual delas poderia ser utilizada no desenvolvimento da metodologia de atualização cartográfica.

Uma vez que a precisão da metodologia de atualização, desenvolvida nesta pesquisa, era dependente das coordenadas altimétricas da área de estudo, realizou-se, também, uma comparação entre os valores altimétricos destes pontos. A metodologia de aquisição da coordenada altimétrica dos pontos de verificação da carta 1:2000 e do mapa digital 1:25000 empregou o processo de interpolação linear entre isolinhas, levando-se em conta a equidistância entre as curvas de nível. O resultado desta comparação altimétrica está representado na tabela 13.

TABELA 13 - DISCREPÂNCIA ALTIMÉTRICA ENTRE AS BASES CARTOGRÁFICAS NA ESCALA DE 1:2000 E 1:25000

Pontos	Coordenadas Altimétricas		ΔH (m)	ΔH (m)
	Carta 2000 (m)	Mapa digital 25000 (m)		
1	757,000	761,580	-4,580	4,580
2	753,000	755,060	-2,060	2,060
3	860,000	861,150	-1,150	1,150
4	843,000	840,000	3,000	3,000
5	823,100	824,030	-0,930	0,930
6	855,800	855,670	0,130	0,130
7	760,780	765,140	-4,360	4,360
9	764,500	763,000	1,500	1,500
Média			-1,056	2,214
Desvio Padrão			2,639	1,625

O resultado da média, desvio padrão e dos valores individuais dos erros altimétricos da tabela 13 comparado com os valores da tabela 8, para o PEC e erro padrão altimétrico, não apresenta grande distorção, não oferecendo dúvida quanto à qualidade das bases altimétricas disponíveis. Consideraram-se os valores das coordenadas altimétricas da carta, na escala de 1:2000 como representativos da topografia da área, e a partir desta foi classificada a altimetria na escala 1:25000.

4.1.1 Avaliação da carta digital 1:25000

O processo de avaliação da qualidade da carta iniciou-se com um teste de normalidade da distribuição da amostra, uma vez que esta é uma amostra considerada pequena ($n < 30$). Conforme exposto no item 3.2.1 o teste de normalidade escolhido foi o de FILLIBEN (1975), assim os procedimentos para o cálculo do coeficiente de correlação (equação 3.9) foram:

1. ordenar na ordem crescente os valores das discrepâncias das coordenadas planimétricas ou altimétricas resultantes;
2. calcular a probabilidade acumulada referente à equação 4.0;
3. determinar com base nas probabilidades acumuladas os valores de z , conforme tabelas de distribuição normal;
4. calcular o coeficiente de correlação da equação 3.9;
5. comparar o coeficiente r calculado com o coeficiente tabelado para o nível de significância de 10% e um número de pontos da amostra de 7;

6. gerar um gráfico Q.QPlot no qual a abscissa represente os valores tabelados de z e cuja ordenada apresente as discrepâncias planimétricas ou altimétricas das coordenadas.

A carta digital na escala de 1:25000 foi avaliada quanto às suas informações planimétricas e altimétricas. Subdividiu-se esta etapa em: avaliação das informações planimétricas e avaliação das informações altimétricas.

4.1.1.1 Avaliação das informações planimétricas

Para a análise da carta digital compararam-se os valores das coordenadas digitais com as coordenadas de campo. A tabela 14 apresenta as discrepâncias apuradas na comparação entre as coordenadas dos pontos de verificação no mapa digital e as coordenadas dos pontos de verificação no campo.

TABELA 14 - DISCREPÂNCIA PLANIMÉTRICA ENTRE OS PONTOS DE VERIFICAÇÃO NO MAPA DIGITAL (1:25000) E SEUS HOMÓLOGOS NO CAMPO

Pontos	Coordenadas do Mapa digital		Coordenadas de campo		Discrepâncias		
	E (m)	N (m)	E (m)	N (m)	ΔE (m)	ΔN (m)	ΔR (m)
1	580219,607	7793693,146	580235,455	7793699,476	-15,848	-6,330	17,065
2	580139,879	7790237,520	580076,027	7790211,464	63,851	26,056	68,963
3	585285,554	7793754,804	585294,004	7793750,801	-8,450	4,003	9,350
4	583224,320	7794165,081	583227,378	7794143,427	-3,058	21,654	21,869
5	582471,392	7791026,841	582471,172	7791037,165	0,220	-10,324	10,327
6	585732,887	7791104,221	585757,524	7791128,852	-24,637	-24,631	34,838
7	579537,197	7788834,688	579527,313	7788819,465	9,884	15,222	18,150
9	585825,044	7788317,048	585829,539	7788340,961	-4,495	-23,913	24,332
Média					2,183	0,217	24,278
Desvio Padrão					26,981	19,713	15,953

Observou-se na tabela 14, que o valor da discrepância resultante correspondente ao ponto dois é maior que três vezes o desvio padrão, o que caracteriza como erro grosseiro.

Para confirmar tal suposição comparou-se o mapa digital com a aerofoto que o originou. Percebeu-se que a discrepância apresentada no ponto 2 foi proveniente da falta de exatidão no processo de restituição fotogramétrica. Assim classificou-se como

erro grosseiro esta discrepância apresentada no ponto dois. Eliminando este ponto da tabela 14, os valores da média e desvio padrão dos erros planimétricos do mapa digital estão representados na tabela 15.

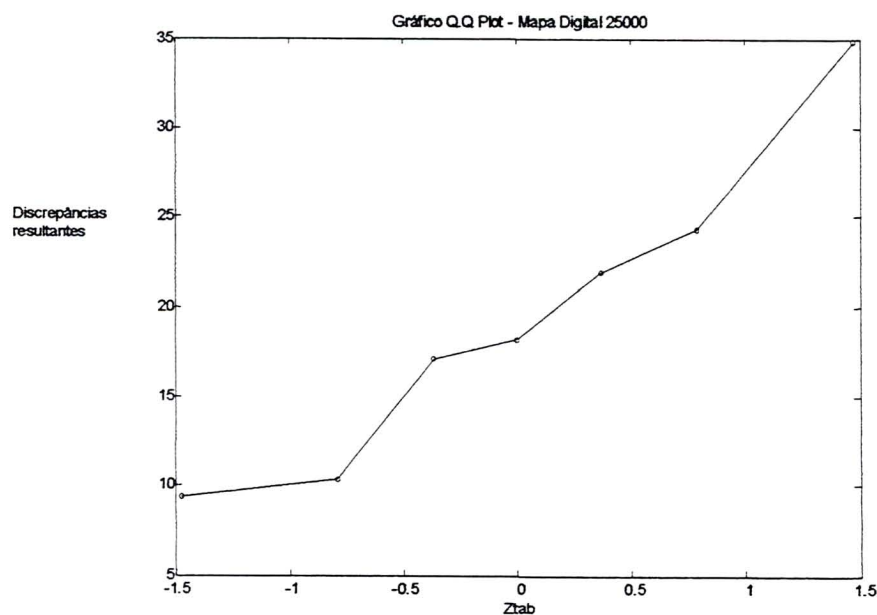
TABELA 15 - DISCREPÂNCIA PLANIMÉTRICA ENTRE OS PONTOS DO MAPA DIGITAL E OS DE VERIFICAÇÃO DO CAMPO COM ELIMINAÇÃO DO ERRO GROSSEIRO

Pontos	Coordenadas Mapa Digital		Coordenadas de campo		Discrepâncias		
	E (m)	N (m)	E (m)	N (m)	ΔE (m)	ΔN (m)	ΔR (m)
1	580219,607	7793693,146	580235,455	7793699,476	-15,848	-6,330	17,065
3	585285,554	7793754,804	585294,004	7793750,801	-8,450	4,003	9,350
4	583224,320	7794165,081	583227,378	7794143,427	-3,058	21,654	21,869
5	582471,392	7791026,841	582471,172	7791037,165	0,220	-10,324	10,327
6	585732,887	7791104,221	585757,524	7791128,852	-24,637	-24,631	34,838
7	579537,197	7788834,688	579527,313	7788819,465	9,884	15,222	18,150
9	585825,044	7788317,048	585829,539	7788340,961	-4,495	-23,913	24,332
Média					-6,626	-3,474	19,419
Desvio Padrão					11,177	18,062	8,747

O valor do coeficiente de correlação calculado com os valores da resultante da tabela 15, obedecendo aos procedimentos apresentados no item 4.1.1, foi de 0,9713. Procurando o valor correspondente na tabela 9 para um nível de significância de 10% ($\alpha=0,1$) e uma amostra com 7 elementos, têm-se como coeficiente de correlação tabelado 0,916. Comparando o valor calculado 0,9713 com o valor tabelado verificou-se que o coeficiente de correlação calculado é maior que o tabelado. Isto permite concluir que a amostra possui distribuição normal.

Analisando o gráfico representado na figura 18 observou-se que os pontos se distribuem aproximadamente como uma reta. Concluiu-se que a distribuição se apresentou normal confirmando o resultado do teste de normalidade pelo coeficiente de correlação.

FIGURA 18 – GRÁFICO Q.Q PLOT DAS DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICAS DO MAPA DIGITAL



Para avaliar a acurácia do mapa digital calculou-se, inicialmente, a média populacional empregando a distribuição t de Student representada na equação 4.1 para um intervalo de confiança de 90%, sendo o desvio padrão populacional desconhecido.

$$\mu \leq \bar{x} + (t_{\alpha}) \left[\frac{s}{\sqrt{n}} \right] \quad (4.1)$$

onde:

μ = média populacional;

\bar{x} = média amostral;

t_{α} = distribuição de Student (escore);

s = desvio padrão da amostra;

n = número de pontos da amostra.

Os valores empregados neste cálculo foram:

\bar{x} e s = valores da média e desvio padrão da resultante constante na tabela 15;

$n = 7$;

Intervalo de confiança = 90%;

Graus de liberdade $v = n - 1 = 6$;

t_{α} = extraído da tabela de distribuição de Student para uma amostra com 6 graus de liberdade (1,44).

O valor determinado para a média populacional empregando os valores descritos anteriormente foi de 24,1784m, ou seja a média populacional é inferior a 24,1784m no intervalo de confiança de 90%.

Para a verificação da classe fez-se necessário um teste de hipótese, pois segundo LEAL (1998) não é suficiente que o erro máximo permitido para as classes (12,5m,20m,25m) seja menor que a maior média possível para o intervalo, é preciso certificar-se qual a probabilidade deste ser menor ou igual aos valores do PEC nas diferentes classes.

Desta forma, para a verificação das classes de qualidades (A,B,C) fez-se um teste de hipótese onde $H_0: \mu \leq \text{PEC}$ para as classes (A,B,C) e $H_1: \mu > \text{PEC}$ para as classes (A,B,C) com um nível de significância de 10%. Rejeitando-se a hipótese H_0 se aceita a H_1 .

Considerando que o desvio padrão populacional é desconhecido usou-se a equação 4.2 que se relaciona com a distribuição t de Student.

$$t = \frac{\bar{x} - \mu_0}{\left[\frac{s}{\sqrt{n}} \right]} \quad (4.2)$$

Onde:

t = estatística amostral calculada;

\bar{x} = média amostral;

s = desvio padrão;

μ_0 = média populacional esperada;

n = tamanho da amostra.

Formulando o teste para a classe A têm-se

$H_0: \mu \leq 12,5\text{m}$

$H_1: \mu > 12,5\text{m}$

$\alpha = 0,1$

Empregando a equação 4.2 calculou-se o valor de 2,0928 para t. Comparando o valor calculado de t - 2,0928 - com o valor tabelado de $t_{\alpha} - 1,44$ - para uma amostra

com 7 pontos e nível de significância de 10%, verifica-se que $t > t_{\alpha}$. Isto significa que, a hipótese H_0 foi rejeitada, o que não permite a classificação do mapa digital na classe A.

Empregando o mesmo procedimento para a classe B têm-se como formulação de hipótese:

$$H_0: \mu \leq 20m$$

$$H_1: \mu > 20m$$

$$\alpha = 0,1$$

O valor calculado para t foi de -0,176. Comparando este valor de t com o valor de $t_{\alpha}(1,44)$ pode-se afirmar que $t < t_{\alpha}$ e portanto aceita-se a hipótese H_0 , significando que a acurácia do mapa digital está dentro do padrão de qualidade da classe B.

Para avaliar a precisão planimétrica da carta na escala de 1:25000 determinou-se inicialmente o desvio padrão populacional empregando a equação 4.3.

$$\sigma \leq \sqrt{\frac{(n-1)s^2}{\chi^2_{1-\alpha}}} \quad (4.3)$$

Onde:

σ = desvio padrão populacional

χ^2 = percentis da distribuição qui quadrado;

s = desvio padrão amostral;

n = número de pontos da amostra

Desta forma o valor obtido para o desvio padrão populacional foi de 14,444, ou seja o desvio padrão estimado da população é inferior a 14,444 no intervalo de confiança de 90%.

Analogamente à avaliação da acurácia é necessário certificar qual a probabilidade do desvio padrão populacional ser menor ou igual ao erro padrão definido pelo Decreto para as classes de qualidade. Para isso, realizou-se o teste de hipótese onde $H_0: \sigma^2 \leq \text{erro padrão (elevado ao quadrado)}$ das diversas classes e a hipótese $H_1: \sigma^2 > \text{erro padrão (elevado ao quadrado)}$ das classes (A,B,C).

Neste teste usa-se a equação 4.4 que emprega a variância que se relaciona com a distribuição Qui Quadrado (χ^2).

$$\chi^2 = \frac{(n-1)s^2}{\sigma_0^2} \quad (4.4)$$

onde:

χ^2 = estatística amostral calculada;

s = desvio padrão amostral;

σ_0^2 = variância populacional esperada;

n = tamanho da amostra.

Formulando a hipótese para a precisão na classe A têm-se:

$H_0: \sigma^2 \leq 7,5m$;

$H_1: \sigma^2 > 7,5m$;

$\alpha = 0,1$

$\chi^2_{\alpha} = 10,65$ (tabelado)

O valor encontrado para a estatística amostral calculada foi de 8,159. Fazendo-se a comparação $\chi^2 = 8,159 < \chi^2_{\alpha} = 10,65$ verifica-se que a hipótese H_0 foi aceita, para um de significância de 10%, portanto a precisão da carta se encontra na classe A.

Concluindo pode-se afirmar que a planimetria do mapa digital na escala de 1:25000 possui classe B. Isto se deve às considerações apresentadas por Leal (1998) na adoção do critério que considera a ordem inferior das classificações conjuntas em acurácia e precisão para se evitar a introdução de incertezas da classe inferior.

4.1.1.2 Avaliação das informações altimétricas

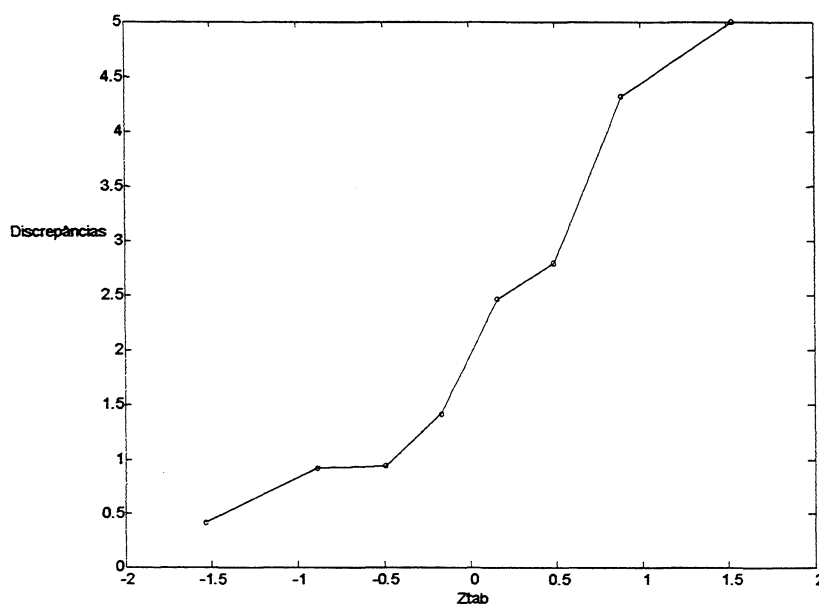
Da mesma forma que no item 4.1.1.1, os dados altimétricos foram avaliados, realizando, inicialmente um teste de normalidade empregando a equação de coeficiente de correlação (3.7) e os valores da tabela 16.

TABELA 16 - DISCREPÂNCIAS ALTIMÉTRICAS DOS PONTOS DA CARTA DIGITAL COM OS PONTOS DE VERIFICAÇÃO DE CAMPO

Pontos	Carta Digital	Campo	Discrepância
	Altimetria (m)	Altimetria (m)	ΔH (m)
1	761,580	757,268	4,312
2	755,060	752,593	2,467
3	861,150	859,742	1,408
4	840,000	842,792	2,792
5	824,030	823,093	0,937
6	855,670	855,265	0,405
7	765,140	760,147	4,993
9	763,000	763,927	0,927
Média			2,280
Desvio Padrão			1,677

O valor do coeficiente de correlação calculado para um nível de significância igual a 10% foi de 0,9603. Observando o valor do coeficiente de correlação da tabela 7, para uma amostra com 8 pontos e um nível de significância de 10% - 0,924 - e comparando-o ao valor do coeficiente calculado - 0,9603 - pode-se afirmar que a amostra possui distribuição normal, pois o valor do coeficiente de correlação calculado é maior do que o tabelado.

FIGURA 19 – GRÁFICO Q.Q PLOT DAS DISCREPÂNCIAS ALTIMÉTRICAS DO MAPA DIGITAL



Analisando o gráfico representado pela figura 19 concluiu-se que a distribuição das discrepâncias resultantes dos pontos altimétricos se apresenta normal, pois os pontos se distribuem aproximadamente como uma reta.

Uma vez que a distribuição da amostra apresentou normalidade, iniciou-se a avaliação da acurácia com o cálculo da média populacional pela equação 4.1.

Os valores empregados neste cálculo foram:

\bar{x} e s = valores da média e desvio padrão da resultante constante na tabela 16;

$n = 8$;

Intervalo de confiança = 90%;

Graus de liberdade $v = n - 1 = 8 - 1 = 7$;

t_α = extraído da tabela de distribuição de Student para uma amostra com 7 graus de liberdade (1,42).

O valor determinado para a média populacional empregando os valores descritos anteriormente foi de 3,1218, ou seja a média populacional é inferior a 3,1218m no intervalo de confiança de 90%.

Para a verificação da classe fez-se necessário um teste de hipótese, pois segundo LEAL (1998) não é suficiente que o erro máximo permitido para as classes seja menor que a maior média possível para o intervalo, é preciso certificar-se qual a probabilidade deste ser menor ou igual aos valores do PEC nas diferentes classes.

Desta forma, para a verificação das classes de qualidades (A,B,C) fez-se um teste de hipótese onde $H_0: \mu \leq \text{PEC}$ para as classes (A,B,C) e $H_1: \mu > \text{PEC}$ para as classes (A,B,C) com um nível de significância de 10%. Rejeitando-se a hipótese H_0 se aceita a H_1 .

Considerando que o desvio padrão populacional é desconhecido usou-se a equação 4.2 que se relaciona com a distribuição t de Student.

Formulando o teste para a classe A têm-se:

$H_0: \mu \leq 5\text{m}$

$H_1: \mu > 5\text{m}$

$\alpha = 0,1$

Empregando a equação 4.2 calculou-se o valor de -4,5854 para t . Comparando o valor calculado de t (-4,5854) - com o valor tabelado de t_{α} (1,42) para uma amostra com 8 pontos e nível de significância de 10%, verifica-se que $t < t_{\alpha}$. Isto significa que, a hipótese H_0 foi aceita, o que permite classificar o mapa digital quanto a acurácia da altimetria dentro da classe A de qualidade.

Para avaliar a precisão altimétrica da carta na escala de 1:25000 determinou-se inicialmente o desvio padrão populacional empregando a equação 4.3.

Desta forma o valor obtido para o desvio padrão populacional foi de 2,6395, ou seja o desvio padrão estimado da população é inferior a 2,6395 no intervalo de confiança de 90%.

Analogamente à avaliação da acurácia é necessário certificar qual a probabilidade do desvio padrão populacional ser menor ou igual ao erro padrão definido pelo Decreto para as classes de qualidade. Para isso, realizou-se o teste de hipótese onde $H_0: \sigma^2 \leq \text{erro padrão (elevado ao quadrado)}$ das diversas classes e a hipótese $H_1: \sigma^2 > \text{erro padrão (elevado ao quadrado)}$ das classes (A,B,C).

Neste teste usa-se a equação 4.4 que emprega a variância que se relaciona com a distribuição Qui Quadrado (χ^2).

Formulando a hipótese para a precisão na classe A têm-se:

$$H_0: \sigma^2 \leq 3,3m;$$

$$H_1: \sigma^2 > 3,3m;$$

$$\alpha = 0,1$$

$$\chi^2_{\alpha} = 12,02 \text{ (tabelado)}$$

O valor encontrado para a estatística amostral calculada foi de 1,8104. Fazendo-se a comparação $\chi^2 = 1,8104 < \chi^2_{\alpha} = 10,65$ verifica-se que a hipótese H_0 foi aceita, para um de significância de 10%, portanto a precisão da altimetria do mapa digital se encontra na classe A.

Concluindo pode-se afirmar que a altimetria do mapa digital na escala de 1:25000 possui classe A.

Desta forma, concluiu-se que o mapa digital na escala de 1:25000 possui classificação B quanto à sua planimetria e classificação A quanto à sua altimetria.

Devido à baixa qualidade das informações planimétricas do mapa na escala de 1:25000, este não foi utilizado como base para a obtenção de coordenadas de pontos de apoio. Seu emprego restringiu-se a servir como referência no processo de detecção das feições cartográficas a serem atualizadas.

4.1.2 Avaliação da carta digital na escala 1:2000

A carta na escala 1:2000 foi proveniente de uma restituição digital, ou seja, é uma amostragem primária de informação conforme item 2.8.1. A avaliação desta carta digital na escala de 1:2000 teve como objetivo verificar a sua confiabilidade para que pudesse ser utilizada como fonte de dados para apoiar e avaliar esta pesquisa, porque a base cartográfica na escala de 1:25000 não apresentou qualidade suficiente para o bom desempenho do trabalho, conforme item 3.2.1. e 4.1.1 O estudo da média e desvio padrão permitiu realizar algumas ponderações sobre a possibilidade de sua aplicação como “base de avaliação” para mapeamento municipal de 1:25000.

Comparando-se as coordenadas planimétricas dos 9 pontos de apoio com as coordenadas da carta digital na escala de 1:2000, encontraram-se respectivamente como a média e o desvio padrão das discrepâncias os valores 3,31m e 0,82m. Estes valores são inferiores aos valores estipulados para o PEC e para o desvio padrão, para a escala 1:25000, conforme tabela 8, o que permite a sua aplicação como apoio e base de avaliação para pesquisa de atualização em 1:25000, pois segundo MERCHANT⁷ (1982) citado por FREITAS et al. (2003), o método de coleta dos pontos de controle deve ter uma precisão três vezes maior que a carta ou o mapa que se analisa. Desta forma, os erros existentes nas coordenadas dos pontos de controle são desprezíveis com relação aos erros do mapa que se vai avaliar a qualidade.

A altimetria da carta em 1:2000 foi avaliada com relação ao levantamento de campo. As duas informações foram referenciadas ao *datum* Córrego Alegre e o espaçamento das curvas de nível é de 1m. Os valores altimétricos dos pontos são provenientes de interpolações lineares, realizadas digitalmente a partir das distâncias

entre as curvas de nível e da equidistância. Analisando-se a média e o desvio padrão das discrepâncias altimétricas - 0,33m e 0,22m - podem-se considerar como satisfatórias as informações da base 1:2000, uma vez que estes valores são inferiores ao PEC e o desvio padrão estipulado na tabela 8, para a escala 1:25000, não apresentando, portanto, problema para seu emprego na pesquisa.

Considerando-se que a carta na escala de 1:2000 possui precisão e acurácia aceitável para ser utilizada como base para a obtenção de coordenadas plani-altimétricas dos pontos de apoio, esta foi utilizada na comparação e avaliação da metodologia de atualização cartográfica.

4.1.3 Avaliação da imagem IKONOS GEO

Inicialmente, verificou-se a qualidade do georreferenciamento da imagem IKONOS GEO realizada pelo fornecedor. Para esta avaliação foram utilizados como pontos da carta na escala de 1:2000, conforme apresentado no item 4.1.2. Coletaram-se 10 pontos de apoio, com distribuição semelhante à apresentada pela figura 17.

A imagem IKONOS está georreferenciada com base no *datum* WGS84 e a carta é referente ao Córrego Alegre. Para comparar as coordenadas destas duas fontes de dados com data diferentes, converteram-se as coordenadas da imagem para o *datum* Córrego Alegre. A conversão foi realizada no programa *ENVI* empregando o processo de reamostragem bilinear. As coordenadas dos pontos de verificação na imagem foram comparadas com as coordenadas da carta 1:2000 e suas discrepâncias são apresentadas na tabela 17.

⁷ Merchant, D. C. Spatial Accuracy Standards for Large Scale Line Maps. In: technical Congress on Surveying and Mapping. Proceedings. Vol. 1, p.222-231, 1982.

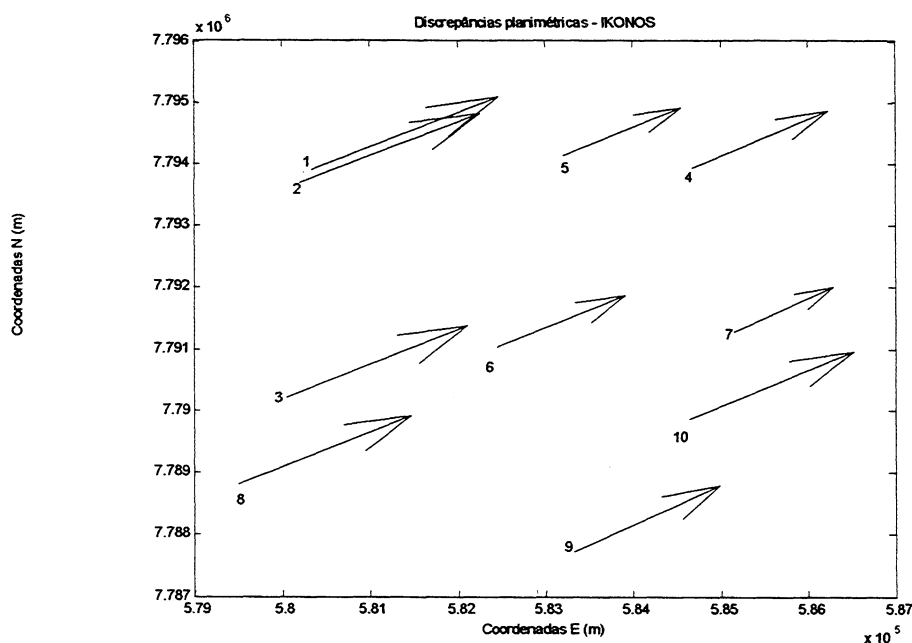
TABELA 17 - DISCREPÂNCIAS ENCONTRADAS NA IMAGEM IKONOS GEO COM RELAÇÃO À CARTA 1:2000

Pontos	Restituição digital		Apoio de Campo		Discrepâncias		
	E (m)	N (m)	E (m)	N (m)	ΔE (m)	ΔN (m)	ΔR (m)
1	580504,05	7793995,09	580342,12	7793905,39	161,93	89,70	185,12
2	580364,05	7793779,09	580208,12	7793692,39	155,93	86,70	178,41
3	580205,05	7790293,09	580048,12	7790203,39	156,93	89,70	180,76
4	584800,05	7794012,09	584681,12	7793941,39	118,93	70,70	138,36
5	583303,05	7794194,09	583201,12	7794134,39	101,93	59,70	118,13
6	582556,05	7791094,09	582444,12	7791029,39	111,93	64,70	129,28
7	585237,05	7791336,09	585150,12	7791281,39	86,93	54,70	102,708
8	579651,05	7788897,09	579501,12	7788812,39	149,93	84,70	172,21
9	583449,05	7787807,09	583322,12	7787725,39	126,93	81,70	150,95
Média					131,43	76,60	152,16
Desvio Padrão					25,95	13,03	28,86

Observou-se nesta primeira análise do produto IKONOS GEO que há uma tendência nas discrepâncias das coordenadas E e N a se concentrarem em valores positivos, conforme a tabela 17 e a figura 20, o que caracteriza uma deformação sistemática diagonal. Considerando-se que a imagem já foi corrigida pela empresa fornecedora, sem, no entanto, utilizar para isso pontos de apoio de campo, esta tendência pode provir do deslocamento provocado pela variação altimétrica do relevo, acentuado pelo tomado inclinada da imagem – ângulo de elevação do sensor igual a 61,59°.

O desvio padrão desta imagem é superior ao mostrado na tabela 2 do item 2.5. As discrepâncias individuais e a média dos erros presentes nesta imagem permitiriam somente sua utilização direta (sem qualquer retificação) em mapeamentos na escala aproximada de 1:370000.

FIGURA 20 - TENDÊNCIA DOS RESÍDUOS PLANIMÉTRICOS DA IMAGEM IKONOS GEO



4.2 ATUALIZAÇÃO CARTOGRÁFICA COM O EMPREGO DA AEROFOTO

A metodologia descrita no item 3.2.6.1 referiu-se à monorrestituição de uma aerofoto singular na escala de 1:30000 cujos resultados e discussões são apresentados neste item. Considerações sobre o sistema de configuração do vídeo são importantes nesta metodologia, uma vez que as feições de atualização foram restituídas sobre a tela (digitalização em tela).

Segundo MITISHITA (1997), a precisão real de uma observação de um ponto na imagem digital, no processo de digitalização em tela, é função da estabilidade do sistema de pontaria, da configuração de vídeo e da resolução da imagem.

Assim, a precisão real da observação de um ponto na imagem digital, no processo de monorrestituição, foi definida por um sistema de pontaria composto por um *mouse* comum, com movimento de esfera e sensores eletrônicos, e resolução de 300dpi, ou seja, com deslocamento linear de 0,085mm; por uma configuração da placa de vídeo de 1152 X 864 *pixels*, para um monitor de 17 polegadas (34,5cm por 25,8cm). Isto significa que a tela é formada por 864 linhas e cada uma delas possui

1152 *pixels*, o que determina a importância de 0,30mm (258mm/864*pixels*) como menor valor de deslocamento do cursor para esta tela.

A aerofoto digitalizada matricialmente com 1000dpi, conforme item 3.1.7.3, ficou com resolução linear de 0,025mm e um valor de 0,00025mm como a discriminação do sistema de medida empregado pelo programa para quantificar os pontos da imagem digital. Este valor de discriminação do sistema de medida ocorreu devido à configuração das unidades de trabalho no programa *Microstation* em 100 subunidades por unidades de trabalho.

O intervalo de movimento do cursor na superfície do vídeo - 0,30mm - é constante e independe do fator de ampliação na tela. Considerando, entretanto, que o sistema gráfico do programa *Microstation* posiciona a imagem digital sobre um plano de desenho referenciando-a ao sistema de coordenadas, formado por uma matriz de pontos bidimensionais de 232 por 232 UOR's (unidade de resolução), o menor movimento do cursor em uma imagem ampliada, representa uma quantidade menor de UOR's, permitindo conseqüentemente uma maior precisão na restituição.

As especificações do sistema de pontaria, da configuração de vídeo e da resolução da imagem associados ao fator de ampliação da tela permitiram a determinação da precisão da observação para a foto e para imagem nesta pesquisa.

A precisão das observações de uma aerofoto teve como base o estudo elaborado por MITISHITA (1997), uma vez que o fator de ampliação foi adaptado à resolução do vídeo de maneira proporcional. Assim, as leituras das marcas fiduciais da aerofoto ocorreram de acordo com a ordem de entrada da coordenada instrumental, no programa SMD, segundo um fator de ampliação de 215 vezes, com base na determinação de uma ampliação para os alvos bem definidos. Da mesma forma, a observação dos pontos fotogramétricos foi definida por detalhes fotoidentificáveis e capturados com um fator de ampliação de 15 vezes, visto que um fator maior de ampliação provoca a perda da nitidez da imagem.

O programa *Microstation* foi utilizado para quantificar os pontos observados na aerofoto e na imagem digital – marcas fiduciais e pontos fotogramétricos. Estas informações de entrada de dados foram relacionadas ao sistema métrico de medidas (definição da unidade de trabalho).

O Sistema de Monorestituidor Digital foi empregado para processar matematicamente as informações quantificadas pelo *Microstation*. Para isso, algumas configurações foram definidas no módulo Cadastro. Este módulo permitiu ao operador cadastrar as informações da câmara, as precisões dos pontos fotogramétricos e pontos de apoio envolvidos no sistema, os parâmetros necessários ao modelamento matemático de superfícies, os parâmetros para a definição do sistema geodésico e do sistema de projeção do projeto e as informações necessárias à parametrização dos erros sistemáticos da imagem fotogramétrica, vide item 2.6.4.

4.2.1 Orientação interior da foto

A orientação interior da aerofoto pode ser considerada, segundo MITISHITA (1997), um procedimento estático de observação, pois admitiu-se que o cursor foi estacionado sobre uma posição pré-definida como alvo, representado pela marca fiducial.

A digitalização matricial da fotografia analógica transformou o alvo (marca fiducial) de aproximadamente 0,1mm em uma imagem de 4x4 *pixels* e a captura de sua coordenada ocorreu no centro destes elementos com um fator de ampliação de 215 vezes. Este alto valor de fator de ampliação é possível porque existe contraste entre o fundo da imagem (escuro) e o alvo (branco) associado à forma geométrica bem definida deste, representada por círculo.

O estudo elaborado por MITISHITA (1997) determina o valor de meio *pixel* como a precisão real das observações determinada para este procedimento, considerando que a aerofoto empregada foi digitalizada matricialmente. No caso deste estudo, o valor do *pixel* é de 0,0125mm.

A tabela 18 apresenta os resultados da modelagem de dados para a correção do trabalho do filme com a utilização do modelo afim geral, conforme item 2.6.1.

TABELA 18 - RESÍDUOS OBSERVADOS NA ORIENTAÇÃO INTERIOR DA AEROFOTO

Orientação interior da foto			
Marca	V_x (mm)	V_y (mm)	RV_{xy} (mm)
1	-0,002	0,003	0,004
2	0,002	-0,003	0,004
3	-0,002	0,003	0,004
4	0,002	-0,003	0,004
Média absoluta	0,002	0,003	0,004
Desvio padrão	0,000	0,000	0,000

Desta forma, analisando-se os valores da tabela de orientação interior da foto pode-se afirmar que estes são inferiores à precisão de meio *pixel* (0,0125mm) definida para eles, o que indica que o modelo afim parametrizou adequadamente as diferenças físicas entre os referenciais instrumental e fiducial, corrigindo, assim, a deformação referente ao trabalho do filme. O número de marcas fiduciais - 4 marcas fiduciais - determinou o modelo matemático empregado nesta pesquisa.

4.2.2 Orientação aproximada da foto

A orientação aproximada calculou os parâmetros da transformação matemática projetiva plana (vide item 2.3.2) empregando os pontos fotogramétricos, os pontos de apoio associados à técnica de ajustamento paramétrico com injeção de posição. Estes parâmetros foram empregados na determinação das coordenadas geodésicas locais planas dos pontos fotogramétricos das feições restituídas. Estas coordenadas geodésicas locais dos pontos observados na aerofoto digital foram utilizadas na primeira determinação altimétrica do ponto no sistema modelamento matemático de superfície.

Esta transformação permitiu a depuração de possíveis erros grosseiros nos pontos de apoio, além de fornecerem coordenadas iniciais para a primeira determinação altimétrica do ponto no sistema de modelamento matemático da superfície.

A tabela 19 mostra os valores dos resíduos planimétricos encontrados na aplicação da transformação projetiva da orientação aproximada da foto.

TABELA 19 - RESÍDUOS PRESENTES NA ORIENTAÇÃO APROXIMADA DA AEROFOTO

Orientação aproximada da foto			
Pontos	V_x (m)	V_y (m)	RV_{xy} (m)
1	2,723	-12,154	12,455
2	2,671	9,556	9,922
3	-1,528	-0,319	1,561
4	-9,026	8,744	12,567
5	-0,036	2,080	2,081
6	19,509	-7,185	20,790
7	-6,944	3,847	7,939
8	15,062	-16,517	22,353
9	-22,431	11,948	25,414
Média Absoluta	8,881	8,039	12,787
Desvio padrão	8,271	5,248	8,570

Analisando os resultados apresentados na tabela 19 verifica-se que os pontos de apoio não apresentaram erros grosseiros, porém, como esperado, este modelo não conseguiu parametrizar as diferenças físicas existentes entre os referenciais, em consequência da diferença de altitude do relevo da região, que varia em torno de 150m. No entanto, as precisões alcançadas foram suficientes para esta transformação, que teve por objetivo fornecer parâmetros para a determinação das coordenadas planas aproximadas das feições restituídas.

4.2.3 Orientação exterior da foto

A orientação exterior da foto empregou os pontos fotoidentificáveis observados na aerofoto, os pontos de apoio de campo, utilizados na orientação aproximada e a distância focal calibrada, para cálculo dos parâmetros de orientação exterior, com o modelo de colinearidade na forma direta (vide item 2.3.2). As considerações apresentadas no item 4.2.1 para os pontos de apoio e fotoidentificáveis valem para esta etapa. A tabela 20 apresenta os resíduos das observações, obtidos no cálculo dos parâmetros de orientação exterior.

TABELA 20 - RESÍDUOS DAS OBSERVAÇÕES NO CÁLCULO DOS PARÂMETROS DA ORIENTAÇÃO EXTERIOR

Orientação exata da foto				
Pontos	Vx (m)	Vy (m)	Vz (m)	RVxyz (m)
1	0,130	-0,805	-0,577	0,999
2	0,565	-0,826	-0,246	1,031
3	-0,830	0,261	0,375	0,947
4	-0,109	0,864	0,506	1,008
5	0,400	0,138	0,013	0,423
6	-0,188	-0,377	0,233	0,481
7	0,219	-0,265	-0,054	0,348
8	0,554	0,572	0,450	0,915
9	-0,741	0,437	-0,701	1,110
Média absoluta	0,415	0,505	0,351	0,807
Desvio padrão	0,270	0,274	0,233	0,299

Analisando a tabela 20, observa-se que o modelo matemático empregado – equação de colinearidade - conseguiu parametrizar as diferenças físicas existentes entre os referenciais da imagem e terreno com uma média de resíduos igual a 0,807m e desvio padrão 0,299m, na determinação dos parâmetros de orientação exterior (χ, ϕ, ω , X_0, Y_0, Z_0) da aerofoto. A precisão do ajustamento é menor que o meio *pixel* determinado como precisão da observação.

4.2.4 Verificação da metodologia de atualização cartográfica de mapas municipais com a técnica de monorrestituição de aerofotos na escala de 1:30000 nos pontos de verificação aleatórios

Conforme descrito no item 3.2.6.1.5, os elementos planimétricos restituídos da aerofoto foram retificados. A retificação das feições cartográficas empregou grades altimétricas provenientes do mapa digital na escala de 1:25000 e da carta digital na escala de 1:2000. Destas feições planimétricas foram selecionados alguns pontos, definidos pelos cruzamentos dos alinhamentos de estradas (eixo central), de arruamentos, quarteirões, muros e cercas, como pontos para a verificação da metodologia de atualização cartográfica com a técnica monorrestituição de aerofotos na escala de 1:30000.

As coordenadas destes pontos monorestituídos foram confrontadas com as coordenadas planimétricas da carta em 1:2000, considerada como exata. As

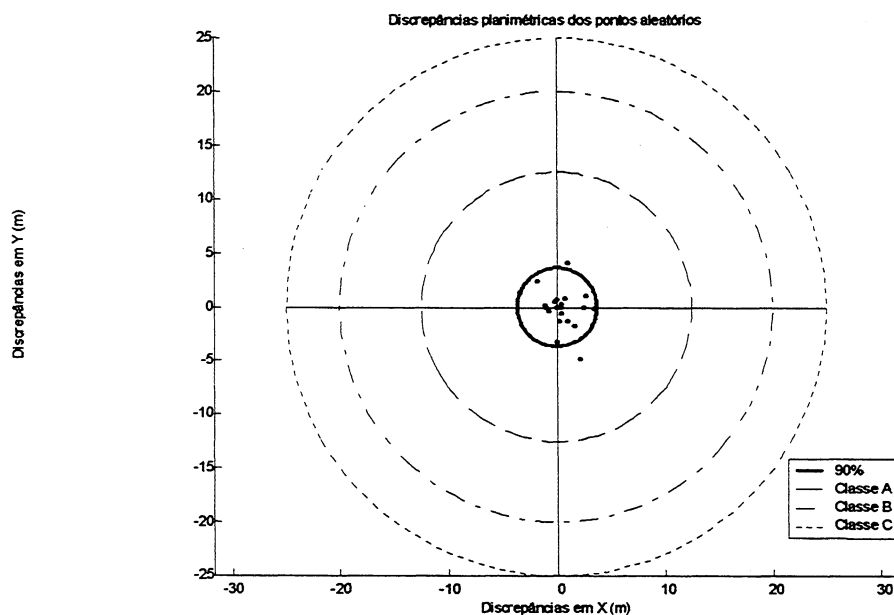
discrepâncias resultantes desta comparação estão representadas nas tabelas 20 e 21. As considerações sobre o procedimento estático de observações referidas no item 4.2.2. são válidas neste procedimento. A tabela 21 apresenta as discrepâncias nos pontos de verificação aleatórios restituídos de aerofotos e retificados com dados altimétricos provenientes de curvas de nível com equidistância de 1 m.

TABELA 21 - DISCREPÂNCIAS NOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO DE ALEATÓRIO MONORESTITUÍDOS DE AEROFOTOS NA ESCALA DE 1:30000

Discrepâncias dos pontos de verificação aleatórios retificados com informações altimétricas provenientes da escala de 1:2000			
Pontos	V_x (m)	V_y (m)	R_{xy} (m)
1	0,414	-0,072	0,420
2	0,477	-0,565	0,739
3	0,160	-1,340	1,350
4	2,460	-0,010	2,460
5	-3,412	1,295	3,649
6	-1,000	0,000	1,000
7	-0,240	0,510	0,564
8	-0,710	-0,350	0,792
9	-1,070	0,130	1,078
10	-0,018	-3,273	3,273
11	0,986	-1,331	1,657
12	1,606	-1,786	2,402
13	2,126	-4,896	5,338
14	-1,775	2,425	3,005
15	3,430	-0,190	3,435
16	2,630	1,022	2,822
17	0,760	0,810	1,111
18	0,956	4,130	4,239
19	0,034	0,704	0,705
20	0,433	0,260	0,505
Média	0,412	-0,126	2,027
Média absoluta	1,235	1,255	2,027
Desvio Padrão	1,074	1,407	1,438

A figura 21 mostra a distribuição das discrepâncias planimétricas existentes nos pontos de verificação aleatórios, retificados pelo processo de monorrestituição de aerofoto, com informações altimétricas provenientes de curvas de nível com equidistância de 1 metro e os círculos definidores das classes de qualidade do Decreto 89817, para um mapeamento na escala de 1:25000.

FIGURA 21 - DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO ALEATÓRIOS E AS CLASSES DE QUALIDADE PARA MAPAS NA ESCALA DE 1:25000



Analisando-se estatisticamente os valores das discrepâncias resultantes da tabela 21, considerando-as, para isso, como uma amostra de distribuição normal, estabeleceu-se para a verificação das classes de qualidade o teste de Student que confronta a hipótese $H_0: \mu \leq \text{PEC}$ e $H_1: \mu > \text{PEC}$, com um nível de significância de 10%. Rejeitando-se a hipótese H_0 se aceita a hipótese H_1 .

Para o teste calcula-se para a distribuição t de Student um valor limite empregando a equação 4.2 e o compara ao valor da distribuição t da tabela de distribuição de Student para um nível de significância de 10% e um determinado grau de liberdade.

Desta forma, para verificar se a qualidade da atualização empregando o processo de monorrestituição de aerofoto na escala 1:30000, com altimetria proveniente de curvas de nível com equidistância de 1m pertence a classe A, formulou-se a seguinte hipótese:

$$H_0: \mu \leq 12,5;$$

$$H_1: \mu > 12,5;$$

O valor de t calculado foi de -33,6589. O valor encontrado na tabela para um nível de significância de 10% e grau de liberdade de 19 foi de 1,328. Comparando o valor calculado com o valor tabelado têm-se: $-32,5660 < 1,328$. Portanto, a hipótese H_0 foi aceita para um nível de confiança de 90%. A atualização cartográfica empregando monorrestituição de aerofotos na escala de 1:30000 e altimetria com curva de nível de 1m possui padrão A de qualidade no quesito acurácia.

Para avaliar a precisão da atualização cartográfica, empregando o sistema de monorrestituição de aerofotos na escala de 1:30000 e altimetria com curvas de nível de 1m, realizou-se o teste de hipótese onde $H_0: \sigma^2 \leq \text{erro padrão (elevado ao quadrado)}$ das diversas classes e a hipótese $H_1: \sigma^2 > \text{erro padrão (elevado ao quadrado)}$ das classes (A,B,C).

Neste teste usou-se a equação 4.4 que emprega a variância que se relaciona com a distribuição Qui Quadrado (χ^2).

Formulando a hipótese para a precisão na classe A têm-se:

$$H_0: \sigma^2 \leq 3,3m;$$

$$H_1: \sigma^2 > 3,3m;$$

$$\alpha = 0,1$$

$$\chi^2_{\alpha} = 27,2 \text{ (tabelado)}$$

O valor encontrado para a estatística amostral calculada foi de 0,6986. Fazendo-se a comparação $\chi^2 = 0,6986 < \chi^2_{\alpha} = 27,2$ verifica-se que a hipótese H_0 foi aceita, para um nível de significância de 10%, portanto a precisão planimétrica da atualização cartográfica se encontra na classe A.

Concluindo pode-se afirmar que a atualização cartográfica empregando monorrestituição de aerofotos na escala de 1:30000 e altimetria com curva de nível de 1m possui classe A.

A tabela 22 apresenta as discrepâncias planimétricas nos pontos de verificação aleatórios restituídos de aerofotos e retificados com dados altimétricos provenientes de curvas de nível com equidistância de 10m.

TABELA 22 - DISCREPÂNCIAS NOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO ALEATÓRIOS MONORESTITUÍDOS DE AEROFOTOS NA ESCALA DE 1:30000

Resíduos dos pontos de verificação aleatórios retificados com informações altimétricas provenientes da escala de 1:25000			
Pontos	V_x	V_y	R_{xy}
1	-4,714	7,892	9,193
2	-1,956	2,722	3,352
3	1,020	1,220	1,590
4	3,160	0,740	3,245
5	-1,361	-0,087	1,364
6	-2,720	-0,700	2,809
7	-2,080	0,600	2,165
8	-0,700	-0,340	0,778
9	-0,810	0,160	0,826
10	0,063	-3,028	3,028
11	0,398	-0,171	0,433
12	-0,254	-0,624	0,674
13	-2,181	-2,920	3,645
14	0,435	2,045	2,091
15	4,080	-0,220	4,086
16	-0,407	0,527	0,666
17	0,104	2,400	2,402
18	-0,271	6,010	6,016
19	-0,016	0,294	0,295
20	0,173	-0,049	0,180
Média	-0,402	0,824	2,588
Média absoluta	1,345	1,637	2,442
Desvio Padrão	1,409	2,099	2,200

Analisando-se estatisticamente os valores das discrepâncias resultantes da tabela 22, considerando-as, para isso, como uma amostra de distribuição normal, estabeleceu-se para a verificação das classes de qualidade o teste de Student.

Desta forma, para verificar se a qualidade da atualização empregando o processo de monorrestituição de aerofoto na escala 1:30000, com altimetria proveniente de curvas de nível com equidistância de 10m pertence a classe A, formulou-se a seguinte hipótese:

$$H_0: \mu \leq 12,5;$$

$$H_1: \mu > 12,5;$$

O valor de t calculado foi de -20,4457. O valor encontrado na tabela para um nível de significância de 10% e grau de liberdade de 19 foi de 1,328. Comparando o valor calculado com o valor tabelado têm-se: $-20,4457 < 1,328$. Portanto, a hipótese H_0 foi aceita para um nível de confiança de 90%. A atualização cartográfica empregando

monorrestituição de aerofotos na escala de 1:30000 e altimetria com curva de nível de 10m pertence a classe A, no quesito acurácia.

Para avaliar a precisão da atualização cartográfica, empregando o sistema de monorrestituição de aerofotos na escala de 1:30000 e altimetria com curvas de nível de 1m, realizou-se o teste de hipótese onde $H_0: \sigma^2 \leq \text{erro padrão (elevado ao quadrado)}$ das diversas classes e a hipótese $H_1: \sigma^2 > \text{erro padrão (elevado ao quadrado)}$ das classes (A,B,C).

Neste teste usou-se a equação 4.4 que emprega a variância que se relaciona com a distribuição Qui Quadrado (χ^2).

Formulando a hipótese para a precisão na classe A têm-se:

$$H_0: \sigma^2 \leq 3,3m;$$

$$H_1: \sigma^2 > 3,3m;$$

$$\alpha = 0,1$$

$$\chi^2_{\alpha} = 27,2 \text{ (tabelado)}$$

O valor encontrado para a estatística amostral calculada foi de 1,6349. Fazendo-se a comparação $\chi^2 = 1,6349 < \chi^2_{\alpha} = 27,2$ verifica-se que a hipótese H_0 foi aceita, para um de significância de 10%, portanto a precisão planimétrica da atualização cartográfica se encontra na classe A.

Concluindo pode-se afirmar que a atualização cartográfica empregando monorrestituição de aerofotos na escala de 1:30000 e altimetria com curva de nível de 10m possui classe A.

A figura 22 mostra a distribuição das discrepâncias planimétricas existentes nos pontos de verificação aleatórios, retificados pelo processo de monorrestituição de aerofoto, com informações altimétricas provenientes de curvas de nível com equidistância de 10 metros e os círculos definidores das classes de qualidade do Decreto 89817, para um mapeamento na escala de 1:25000.

Observando-se o conjunto dos resultados apresentados nas tabelas 21 e 22 pode-se afirmar que as feições cartográficas restituídas da aerofoto na escala de 1:30000 e retificadas empregando-se informações altimétricas diferentes (10m e 1m), apresentaram discrepâncias compatíveis com a escala de trabalho - 1:25000.

Analisando-se o ponto que apresenta maior discrepância planimétrica da tabela 22 – ponto 1 – verificou-se a existência de um erro altimétrico proveniente da base ou mesmo a desatualização da mesma. Analisando-se as médias das discrepâncias resultantes nas referidas tabelas, valores determinantes das acurácias dos pontos de verificação, constata-se que a diferença entre os pontos retificados com as duas altimetrias não foi significativa para a escala da pesquisa. Para esta afirmação formulou-se a hipótese:

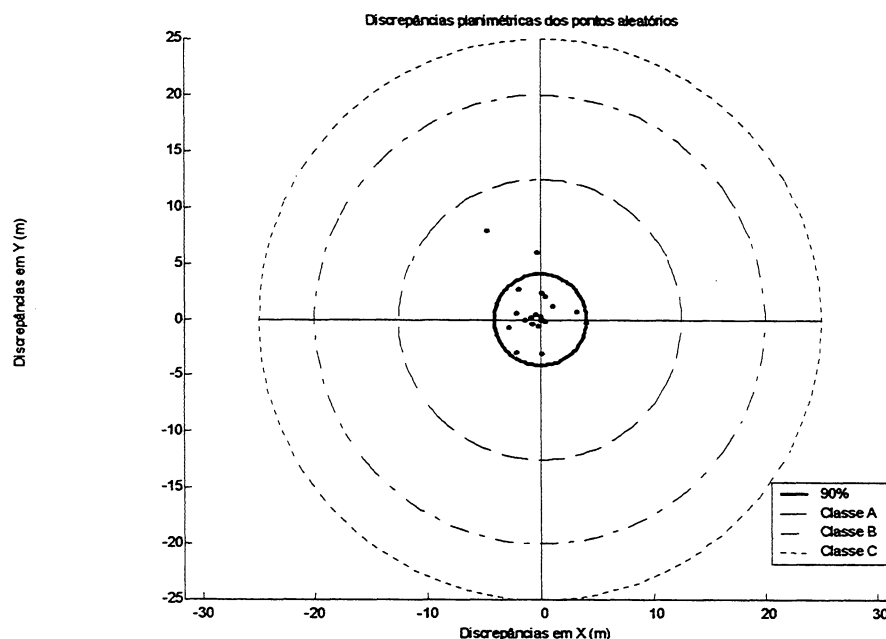
$H_0: \mu_1 = \mu_2$ não há diferença significativa entre as duas amostras no nível de significância de 10% e

$H_1: \mu_1 \neq \mu_2$ há diferença significativa entre as amostras

O cálculo de t da distribuição de Student entre as duas amostras determina - 1,2454 e 1,303 como valor tabelado para o nível de significância de 10% e 38 graus de liberdade. Considerando, que o teste aplicado é bilateral, o valor calculado está no intervalo de -1,303 a 1,303 e a hipótese H_0 foi aceita. Desta forma, pode-se dizer que não há diferença significativa entre as amostras.

Observa-se, no entanto, uma dispersão maior nos erros provenientes da retificação com a altimetria do mapeamento de 1:25000, representada pelo valor do desvio padrão das discrepâncias das tabelas 20 e 21. A média e o desvio padrão das tabelas 21 e 22, comparados com a média e o desvio padrão da tabela 8, permitem afirmar que a qualidade do mapa original (classe A) foi mantida no processo de monorrestituição de aerofotos. Os gráficos representados nas figuras 21 e 22 mostram que 100% dos pontos de verificação são menores que o PEC determinado para mapeamentos na escala de 1:25000.

FIGURA 22 – DISTRIBUIÇÃO DAS DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO ALEATÓRIOS NAS CLASSES DE QUALIDADE



4.2.5 Verificação da metodologia de atualização cartográfica de mapas municipais, em diversas entidades gráficas, com a técnica de monorrestituição de aerofotos na escala 1:30000

As entidades gráficas do mapa municipal foram definidas no item 2.2 como: igrejas, escolas, minas, indústrias, campos de pouso, rodovias, área urbana, hidrografia. Para se avaliar a precisão destes dados representados no mapa de atualização, agruparam-se estes elementos conforme sua característica de representação gráfica, uma vez que as informações de edificação rural, escola, igreja são representadas por símbolos pontuais, os elementos hidrográficos artificiais da atualização cartográfica – lagoas e represas – são polígonos irregulares, os campos de futebol são polígonos regulares e as ferrovias e rodovias e arruamentos são elementos lineares, na escala de estudo (1:25000).

A metodologia de avaliação da precisão dos elementos pontuais considerou o centro do objeto como representativo de sua posição planimétrica e para os polígonos

irregulares empregou-se a localização do centróide destas feições, como elemento comparativo. Já os polígonos regulares e os elementos lineares foram avaliados segundo as coordenadas dos pontos definidores das arestas, entroncamentos dos arruamentos e rodovias, sendo considerado nestes tipos de representação as suas características de alinhamento definido ou indefinido. Considerou-se como alinhamento definido os arruamentos e rodovias com meio fio e pavimentação e alinhamento indefinido os arruamentos e rodovias sem revestimento, onde não se pode determinar com exatidão a borda delimitadora.

Considerando-se que os resultados apresentados nos pontos de verificação, com altimetria proveniente de curvas de nível de 10m, foram satisfatórios para a atualização planimétrica de uma carta na escala de 1:25000, apresentou-se somente o resultado estatístico de diferentes feições do mapa de atualização da aerofoto retificadas com altimetria provenientes das curvas com equidistância de 10m. A tabela 23 apresenta o resumo do resultado estatístico das diferentes feições do mapa de atualização, retificado pelo processo de monorrestituição de aerofoto, com informações altimétricas provenientes de curvas de nível com equidistâncias de 10 metros.

TABELA 23 - RESUMO DO RESULTADO ESTATÍSTICO DE DIFERENTES FEIÇÕES DO MAPA DE ATUALIZAÇÃO CARTOGRÁFICA PROVENIENTE DA MONORRESTITUIÇÃO DA AEROFOTO

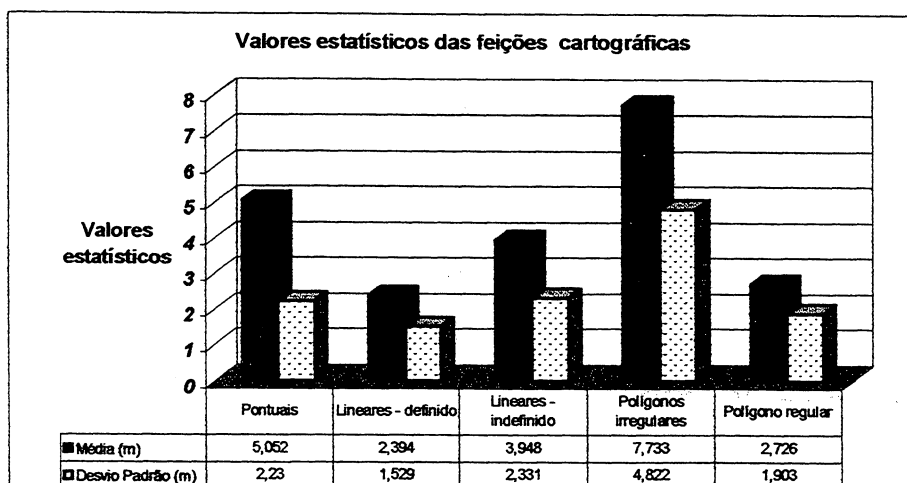
Feições	Número de pontos	Média (m)	Desvio Padrão (m)
Pontuais (edificação rural, escola, igreja)	20	5,052	2,230
Lineares (de alinhamento definido*)	14	2,394	1,529
Lineares (Alinhamento indefinido**)	19	3,948	2,331
Polígonos irregulares (lagoa, represa)	8 (8 polígonos)	7,733	4,822
Polígono regular (campo de futebol)	16 (4 polígonos)	2,726	1,903

* referem-se às estradas pavimentadas e arruamentos com revestimento sólido;

** referem-se às estradas sem pavimentação, de leito natural e arruamentos sem revestimento ou com revestimento solto.

A figura 23 apresenta o resumo dos valores estatísticos das feições cartográficas segundo suas características gráficas.

FIGURA 23 – VALORES ESTATÍSTICOS DAS FEIÇÕES CARTOGRÁFICAS SEGUNDO SUAS CARACTERÍSTICAS GRÁFICAS



O resultado apresentado na tabela 23, para as várias representações cartográficas demonstra que os objetos da superfície do terreno que possuem características bem definidas são melhores identificados na aerofoto no processo de interpretação e restituição, o que resulta em uma menor discrepância planimétrica, no processo de monorrestituição digital, vide figura 23.

A ocorrência de maiores discrepâncias nas feições pontuais deve-se à altura do objeto, que não é considerada no modelo digital de terreno que representa as informações do relevo. A ocorrência de discrepâncias nos polígonos irregulares deve-se a uma alteração no volume de água das lagoas e represas, devido à época do ano na qual foram tomadas as fotografias, o que acarretou diferença no traçado e consequentemente, alteração da posição do centróide.

A avaliação dos polígonos regulares considerou as coordenadas das arestas definidoras das feições. Observou-se em dois destes polígonos retificados a existência de deformações em um de seus pontos extremos (cantos). Verificando-se a causa da diferença nas coordenadas dos polígonos (campos de futebol) compararam-se os dados da fonte altimétrica (curvas de nível) e o mapa de atualização. Nesta comparação, constatou-se um desnível de 10 metros na região de dois dos campos de futebol avaliados, justamente onde ocorreram as maiores discrepâncias nas coordenadas planimétricas dos pontos destas feições. Isto justifica a diferença dos valores da

acurácia e do desvio padrão das feições de polígonos regulares comparadas com as feições de alinhamento definido.

Os valores das médias e desvio padrão apresentados na tabela 23 para as diversas feições cartográficas não comprometem a qualidade da carta a ser atualizada, pois são inferiores aos valores determinados para o PEC e erro padrão da tabela 8, em uma carta no padrão de classificação A, na escala de 1:25000.

4.3 VERIFICAÇÃO DA RETIFICAÇÃO DA ATUALIZAÇÃO CARTOGRÁFICA COM A IMAGEM IKONOS

A metodologia descrita no item 3.2.7.2 referiu-se à monorrestituição de uma imagem de satélite -IKONOS, com a aplicação de diversos modelos matemáticos para a retificação do arquivo vetorial e cujos resultados e discussões são apresentados nos itens 4.3.1, 4.3.2, 4.3.3. e 4.3.4.

Da mesma forma que no item 4.2, pode-se considerar que a precisão real de uma observação de um ponto na imagem digital é função da estabilidade do sistema de pontaria, da configuração de vídeo e da resolução da imagem, pois o procedimento empregado para realizar a observação das feições cartográficas foi a digitalização de tela.

Levando-se em conta que a resolução geométrica da imagem de satélite é diferente da aerofoto, apesar do sistema de pontaria e da configuração da placa de vídeo serem os mesmos, executou-se um teste para determinar qual é a precisão da observação das feições lineares. Empregaram-se, neste teste, ampliações na imagem de 10 e 15 vezes, pois as considerações feitas sobre o fator de ampliação da foto, no item 4.2, são válidas para a imagem de satélite.

Para a realização do teste foram traçados quatro quarteirões com três observações cada um. Nos pontos definidores das esquinas dos quarteirões foram lidos os deslocamentos ocorridos a cada digitalização, ou seja, três observações para cada ponto foram realizadas. Desta forma, foram realizadas 30 leituras digitais para a avaliação da precisão da observação. Estes deslocamentos das observações estão esquematizados na tabela 24.

TABELA 24 - OBSERVAÇÕES DE PONTOS PONTOS FOTOIDENTIFICÁVEIS COM FATORES DE AMPLIAÇÃO DE 10 E 15 VEZES

Pontos	Deslocamento dos pontos com aumento de 10 vezes (m)	Deslocamento dos pontos com aumento de 15 vezes (m)
1	1,140	0,651
2	1,542	1,419
3	2,446	2,009
4	0,990	1,340
5	1,422	0,905
6	0,971	0,949
7	1,132	0,912
8	1,525	2,297
9	2,388	1,419
10	1,010	1,445
11	3,220	2,079
12	2,210	2,458
13	1,393	0,992
14	1,393	0,650
15	0,000	1,489
16	1,453	0,957
17	3,448	1,360
18	2,120	0,912
19	0,980	0,630
20	0,980	1,445
21	1,358	0,927
22	1,633	0,660
23	0,976	1,409
24	2,434	1,250
25	2,150	1,433
26	3,445	1,847
27	1,517	0,660
28	1,374	0,891
29	3,140	1,250
30	1,517	0,920
Média	1,710	1,252
Desvio padrão	0,830	0,497

Os resultados das observações realizadas no traçado das feições cartográficas com diferentes fatores de ampliação, apresentado na tabela 24, mostram que a aplicação do fator de ampliação de 15 vezes sobre a imagem garante uma melhor precisão na digitalização das feições cartográficas. A precisão da observação de feições cartográficas em uma imagem de satélite de alta resolução (IKONOS) pode ser considerada como meio *pixel* (0,497m) para um fator de ampliação de 15 vezes. A aplicação de fatores de ampliação maiores que 15 vezes prejudicam a nitidez da imagem e, portanto, não foram testados.

4.3.1 Verificação da metodologia de atualização cartográfica de mapas municipais, com a técnica de monorrestituição de imagem de satélite - IKONOS - empregando a transformação projetiva no plano

Considerando-se que a imagem IKONOS foi referenciada a um sistema de projeção e sistema geodésico, empregou-se a transformação projetiva no plano para modelar as diferenças físicas entre os referenciais da imagem e do terreno, cuja propriedade característica é a colinearidade invariante, ou seja, o ponto imagem e o ponto objeto (no terreno) pertencem a uma mesma reta.

Para retificar as informações vetoriais da atualização cartográfica, nove pontos de apoio foram selecionados na carta de 1:2000, conforme especificado no item 3.2.2., e a leitura destes pontos na imagem foi realizada no programa *Microstation* empregando-se um fator de ampliação de 15 vezes.

Os resíduos das observações provenientes do ajustamento para a determinação dos parâmetros com 9 pontos de apoio, a técnica dos mínimos quadrados e modelo paramétrico com injunção de posição, bem como os valores dos parâmetros desta transformação, estão representados nas tabelas 25 e 26.

TABELA 25 - RESÍDUOS DAS OBSERVAÇÕES NO REFERENCIAL DO TERRENO EMPREGANDO O MODELO DE TRANSFORMAÇÃO PROJETIVA NO PLANO

Resíduos da Transformação projetiva			
Pontos	V_x (m)	V_y (m)	R_{vxy} (m)
1	-11 452	-5 769	12 823
2	9 485	4 130	10 346
3	18 147	9 492	20 479
4	-3 566	-1 350	3 813
5	-5 500	-1 546	5 713
6	17 553	-10 764	20 030
7	-11 254	-3 424	11 763
8	16 959	8 720	19 069
9	4 074	0 511	4 106
Média absoluta	10 888	5 078	12 016
Desvio Padrão	5 760	3 815	6 696

TABELA 26 - VALORES DOS PARÂMETROS DA TRANSFORMAÇÃO PROJETIVA E SEUS DESVIOS PADRÃO

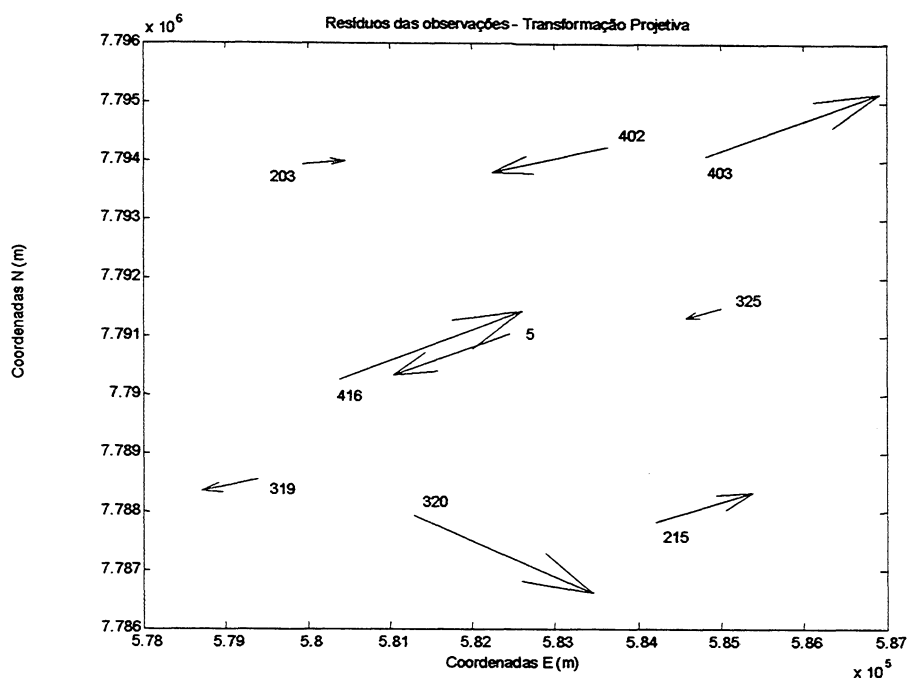
Parâmetros da transformação projetiva e suas precisões		
Parâmetros	Valores dos Parâmetros	Precisões
A1	0,9930122	0,0141258
A2	0,0031453	0,0114090
A3	7117,1806683	10,9969712
A4	0,0000000	0,0000016
A5	0,0000001	0,0000013
A6	-0,0075083	0,0114586
A7	0,9991962	0,0099096
A8	6676,4017099	12,4226940

Analisando-se a média e o desvio padrão dos resíduos apresentados na tabela 25, pode-se considerá-los dentro da faixa de classificação A, se comparados aos valores de referência para o PEC e desvio padrão da tabela 8. No entanto, analisando-se a exatidão do modelo matemático pelos valores individuais dos resíduos, pode-se afirmar que mais do que 10% dos pontos possuem resíduos superiores ao PEC na escala de estudo (12,5m), o que impediu a sua classificação em qualquer das classes de qualidade.

Representando-se espacialmente os vetores resultantes dos resíduos planimétricos – coluna 2 e 3 da tabela 25 – na figura 24, verifica-se uma deformação sistemática no sentido diagonal da imagem (SW-NE).

Concluiu-se que existem outras diferenças físicas que não foram corretamente modeladas com a transformação projetiva, tal como o deslocamento posicional devido ao relevo. Portanto, este modelo não conseguiu minimizar, adequadamente, as deformações geométricas existentes na imagem IKONOS e, por isso, esta transformação não foi empregada para retificar as informações vetoriais provenientes da imagem IKONOS.

FIGURA 24 - RESÍDUOS DAS OBSERVAÇÕES NA TRANSFORMAÇÃO PROJETIVA NO PLANO



4.3.2 Verificação da metodologia de atualização cartográfica de mapas municipais, com a técnica de monorrestituição de imagem de satélite - IKONOS – empregando-se a transformação afim no plano

O modelo de transformação afim, representado pela equação 2.2 do item 2.9.2, foi aplicado para retificar as informações da atualização cartográfica restituída na imagem de satélite IKONOS. Da mesma forma que na transformação projetiva, considerou-se que a imagem IKONOS foi referenciada a um sistema de projeção e sistema geodésico. A partir desta consideração pressupôs-se que a diferença física entre os referenciais da imagem e do terreno estava relacionada aos fatores de rotação, translação, escala diferentes nos eixos.

Os mesmos 9 pontos observados para o modelo projetivo foram empregados na determinação dos parâmetros da transformação afim. A técnica de ajustamento pelos mínimos quadrados, com o método paramétrico com injeção de posição, foi utilizada

nesta determinação. Os resíduos provenientes deste ajustamento estão representados na tabela 27.

TABELA 27 - RESÍDUOS DAS OBSERVAÇÕES NO REFERENCIAL DO TERRENO EMPREGANDO O MODELO DE TRANSFORMAÇÃO AFIM NO PLANO

Resíduos da Transformação afim no plano			
Pontos	V_x (m)	V_y (m)	RV_{xy} (m)
1	-11,200	-5,041	12,282
2	10,404	4,077	11,174
3	18,957	9,192	21,068
4	-4,401	-1,598	4,682
5	-5,675	-2,047	6,032
6	-16,94	-10,049	19,697
7	-11,458	-3,907	12,106
8	16,284	8,290	18,273
9	4,030	1,083	4,173
Média absoluta	11,039	5,032	12,165
Desvio Padrão	5,563	3,383	6,440

TABELA 28 - VALORES DOS PARÂMETROS DA TRANSFORMAÇÃO AFIM E SEU DESVIO PADRÃO

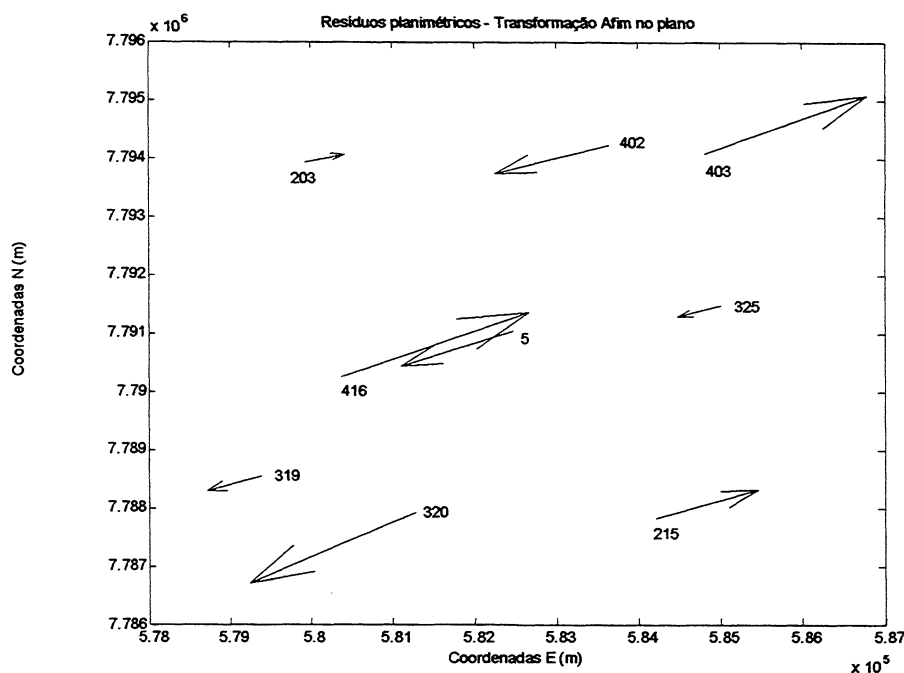
Parâmetros da transformação afim e suas precisões		
Parâmetros	Valores dos Parâmetros	Precisões
A ₁	0,9927748	0,0039757
A ₂	0,0022247	0,0032972
A ₃	7116,9479831	8,5459355
A ₄	-0,0076979	0,0039869
A ₅	0,9983940	0,0033065
A ₆	6675,6902783	8,5700961

Analisando-se os resíduos das observações – coluna 4 da tabela 27 - observa-se que seus valores são superiores ao admitido, para mapeamento na escala de 1:25000, vide tabela 8. Considerando-se que a imagem foi referenciada a um sistema de projeção e sistema geodésico, as transformações planas deveriam ser capazes de modelar com melhor exatidão as diferenças físicas – translação, rotação, escalas diferentes nos eixos - entre os referenciais envolvidos. No entanto, a transformação afim não conseguiu parametrizar as diferenças físicas entre os referenciais. Inferiu-se que ocorreram outras diferenças físicas que não foram modeladas, tal como o deslocamento posicional provocado pelo relevo da região, cuja variação altimétrica na área de estudo é de, aproximadamente, 170m.

Representando-se os vetores resultantes dos resíduos planimétricos das observações - coluna 2 e 3 da tabela 27 – na figura 25, pode-se verificar uma

deformação sistemática na diagonal da imagem, que pode ser atribuída, em parte, ao deslocamento provocado pelo relevo da região.

FIGURA 25 - RESÍDUOS DAS OBSERVAÇÕES NA TRANSFORMAÇÃO AFIM NO PLANO



Analisando-se os valores individuais dos resíduos planimétricos das observações, verifica-se que mais do que 10% destes possuem valores acima do tolerado para o PEC, para o mapeamento na escala de 1:25000, no padrão A de classificação (vide tabela 8). Concluiu-se, portanto, que o modelo não é apropriado para retificar as informações vetoriais do mapa de atualização.

4.3.3 Verificação da metodologia de atualização cartográfica de mapas municipais, com a técnica de monorrestituição de imagem de satélite - IKONOS - empregando a transformação DLT

A equação DLT é uma forma diferente de escrever a equação de colinearidade, onde as coordenadas do plano gráfico (imagem) são transformadas diretamente em coordenadas geodésicas, sem a realização da orientação interior e exterior. Estes parâmetros de orientação interior e exterior estão agrupados dentro dos parâmetros da equação DLT, vide item 2.3.9.

Esta transformação foi desenvolvida por ABDEL-AZIZ E KARARA (1971) para realizar a calibração de câmara não métrica, cujas informações de coordenadas das marcas fiduciais e distância focal não são conhecidas. Por esta razão, sua utilização, neste estudo, é de grande importância, porque não se conhecendo os parâmetros de câmara da imagem IKONOS – distância focal precisa e coordenadas marcas fiduciais - é difícil corrigir ou minimizar as deformações geométricas da imagem, empregando a equação de colinearidade, tradicionalmente empregada na fotogrametria. Além disso, a forma de captura da imagem IKONOS - linha a linha - determina uma projeção central, no sentido transversal de varredura (vide item 3.2.7.2) e uma projeção paralela na direção longitudinal de varredura. Esta forma de captura exige o conhecimento das atitudes do satélite para que sejam corrigidas, linha a linha, as deformações geométricas da imagem com a referida equação.

Devido a esta dificuldade de correção das deformações geométricas da imagem, linha a linha, foram considerados constantes e linear os parâmetros de orientação e o movimento do satélite, respectivamente, sobre pequena área imageada - 7092x7092 *pixels*.

Para avaliar o modelo DLT (equação 2.8) na metodologia de atualização cartográfica empregaram-se, nesta pesquisa, nove e dezoito pontos de apoio para determinar os parâmetros com a técnica dos mínimos quadrados e modelo paramétrico com injeção de posição. Para retificar as informações vetoriais restituídas da imagem IKONOS foram utilizadas duas fontes de informação altimétricas – provenientes de curvas de nível com equidistância de um e dez metros. Os resultados conseguidos no modelamento com nove e dezoito pontos de apoio são apresentados a seguir.

4.3.3.1 Verificação da aplicação de 9 e 18 pontos de apoio no ajustamento com a técnica dos mínimos quadrados e transformação DLT na imagem IKONOS

O modelo matemático DLT foi utilizado na transformação das observações no referencial do plano gráfico (imagem) para o referencial do terreno. Para a determinação dos parâmetros matemáticos de transformação do referido modelo, são

requeridas coordenadas de pontos de apoio no referencial do terreno e coordenadas das observações no referencial do plano gráfico. Empregando-se a DLT na sua forma direta - equação 2.8 – podem-se determinar os parâmetros com a resolução do sistema de equações. Cada ponto com coordenadas fotogramétricas e geodésicas conhecidas dá origem a duas equações. Considerando-se que o modelo DLT possui 11 parâmetros, empregando-se seis pontos, têm-se doze equações para a solução única. No entanto, para assegurar a correta determinação dos parâmetros, para permitir a detecção de erros grosseiros nas observações e para prover resultados que permitam a análise das precisões dos parâmetros determinados, foram empregados nove e dezoito pontos de apoio. Os graus de liberdade do ajustamento das observações pela técnica dos mínimos quadrados e método paramétrico com injunção de posição, portanto, foram sete e quinze, respectivamente.

Os resíduos das observações obtidos no ajustamento com nove pontos de apoio são apresentados na tabela 29 e os parâmetros com seu desvio padrão, determinados neste ajustamento, estão descritos nas tabelas 30 e 31.

TABELA 29 - RESÍDUOS DAS OBSERVAÇÕES PRESENTES NA TRANSFORMAÇÃO DLT

Transformação DLT				
Pontos	V_x (m)	V_y (m)	V_z (m)	R_{xyz} (m)
5	-0,456	0,415	0,158	0,636
203	0,266	-0,092	-0,148	0,318
215	0,358	-0,138	-0,166	0,418
319	-0,545	-0,133	0,397	0,687
320	0,303	0,760	-0,440	0,929
325	-0,099	-0,701	0,258	0,753
402	0,609	0,266	-0,431	0,792
403	-0,596	0,264	0,281	0,710
416	0,159	-0,641	0,091	0,667
Média Absoluta	0,377	0,379	0,263	0,657
Desvio padrão	0,187	0,261	0,133	0,186

TABELA 30 - VALORES DOS PARÂMETROS DA TRANSFORMAÇÃO DLT COM 9 PONTOS DE MODELAGEM E SEUS DESVIOS PADRÃO

Parâmetros da transformação DLT e suas precisões (m)		
Parâmetros	Valores dos Parâmetros	Precisões
L ₁	0,9887582	0,0073031
L ₂	0,0045211	0,0007602
L ₃	-0,7055816	0,0937732
L ₄	7609,070	25,7799481
L ₅	-0,0051109	0,0007923
L ₆	0,9897024	0,0076934
L ₇	-0,3671297	0,0737293
L ₈	6902,529	21,5977478
L ₉	0,0000000	0,0000001
L ₁₀	0,0000000	0,0000001
L ₁₁	-0,0000123	0,0000100

TABELA 31 - VALORES DOS PARÂMETROS DA ORIENTAÇÃO EXTERIOR CALCULADOS PELA TRANSFORMAÇÃO DLT COM 9 PONTOS DE MODELAGEM

Parâmetros da Orientação Exterior Determinados pelo modelo DLT	
Distância focal em x	99033,203
Distância focal em y	86062,740
Coordenada do ponto principal em x	57485,238
Coordenada do ponto principal em y	29798,828
Parâmetro Phi(°)	0,028
Parâmetro Omega(°)	-0,094
Parâmetro Kappa(°)	35,485
Parâmetro X ₀	50331,068
Parâmetro Y ₀	23505,184
Parâmetro Z ₀	81465,560

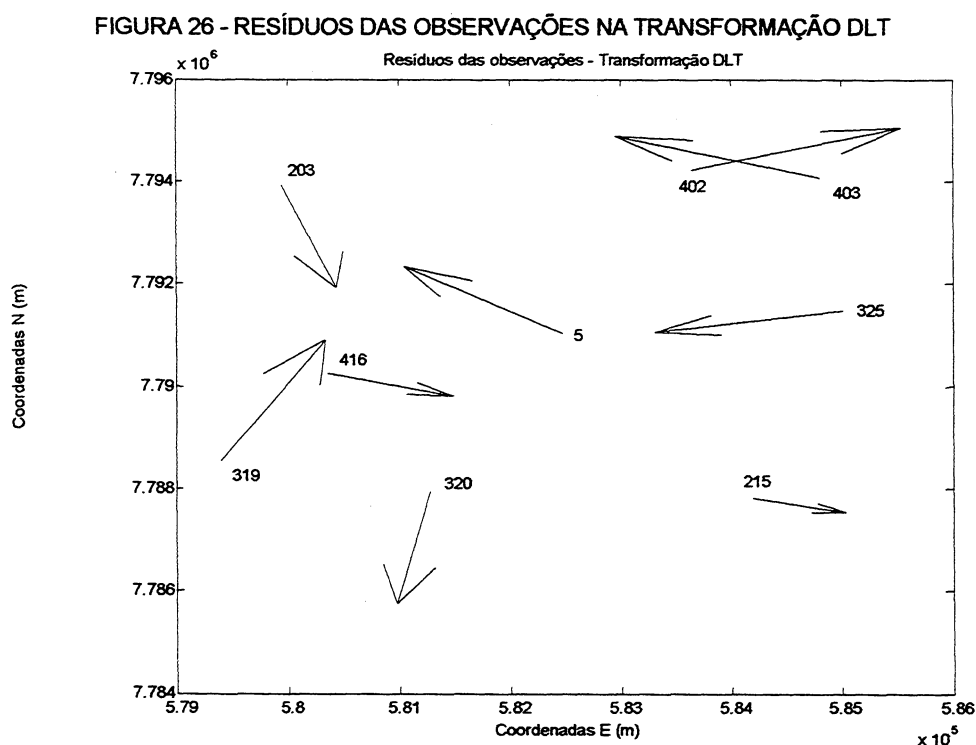
Os resultados apresentados na tabela 29 mostram que a transformação DLT conseguiu modelar as diferenças físicas entre os referenciais da imagem e do espaço objeto, com precisão de 0,186m, ou seja, inferior a meio *pixel* (0,5m) que é o valor determinado como precisão das observações, conforme descrito no item 4.3.

Os valores determinados para os parâmetros pelo modelo DLT mostrados na tabela 31 não têm significado real, pois foram determinados para uma cena tomada de uma só vez - quadros - o que não condiz com a real formação da imagem IKONOS.

Os valores individuais e a média dos resíduos das observações – coluna 5 da tabela 29 - são inferiores ao estipulado pelo PEC (12,5m) para a escala em estudo – 1:25000. O desvio padrão dos resíduos das observações (na coluna 5) é inferior,

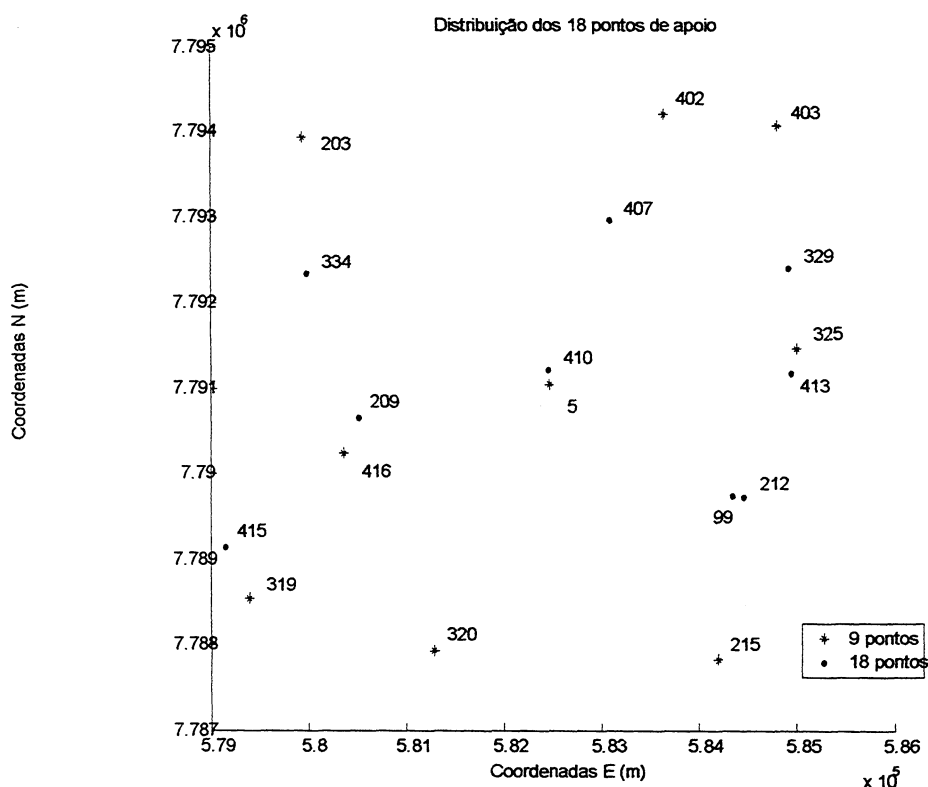
também, ao valor determinado para o desvio padrão (7,5m), conforme BRASIL (1984) para a escala em questão, (vide tabela 8).

A representação espacial dos vetores resultantes dos resíduos planimétricos das observações da figura 26, permite dizer que os erros sistemáticos presentes no modelo afim e no projetivo foram minimizados com esta transformação matemática. A deformação sistemática diagonal (SW-NE), apresentada nos resíduos dos modelos matemáticos, afim e projetivo, não está presente neste ajustamento. Ela teve um melhor tratamento com a correção do relevo no modelo implementado - DLT.



Buscando pesquisar o comportamento dos resíduos das observações nas diferentes regiões da imagem, aumentou-se o número de pontos de apoio para realizar o cálculo dos parâmetros do modelo matemático DLT, conforme distribuição apresentada pela figura 27.

FIGURA 27 - DISTRIBUIÇÃO DOS 18 PONTOS DE APOIO NA ÁREA DE ESTUDO



Observando-se a figura 27, percebe-se uma ausência de pontos de apoio em determinadas regiões da imagem. Isto se deve à dificuldade de se conseguir elementos com resposta espectral e formas geométricas definidas. Estas regiões com ausência de pontos de apoio são, normalmente, áreas rurais com cobertura florestal na imagem.

A tabela 32 apresenta os resíduos das observações, obtidos na determinação dos parâmetros, com a técnica dos mínimos quadrados, método paramétrico com injunção de posição, modelo DLT e dezoito pontos de apoio. As tabelas 33 e 34 apresentam os valores dos parâmetros e seu desvio padrão do modelo DLT.

TABELA 32 - RESÍDUOS DAS OBSERVAÇÕES PRESENTES NA TRANSFORMAÇÃO DLT NO REFERENCIAL DO TERRENO

Transformação DLT (valores observados no terreno)				
Pontos	V _x (m)	V _y (m)	V _z (m)	R _{vxyz} (m)
5	-0,996	0,899	0,306	1,376
99	-0,981	-0,350	0,666	1,236
215	0,916	-0,029	-0,511	1,049
209	-1,598	0,714	0,732	1,897
212	1,488	0,236	-0,917	1,764
410	-0,333	-1,241	0,568	1,405
413	0,536	-0,233	-0,231	0,628
415	0,097	-1,559	0,435	1,621
416	0,657	-0,104	-0,359	0,756
325	-0,844	-0,349	0,580	1,082
319	-0,413	0,630	0,046	0,755
320	0,183	1,189	-0,495	1,301
334	-0,010	-0,791	0,238	0,826
407	1,271	0,060	-0,750	1,477
402	-0,050	1,263	-0,326	1,305
403	-0,247	-0,304	0,225	0,452
329	-0,747	-0,366	0,529	0,986
203	1,070	0,335	-0,736	1,341
Média absoluta	0,691	0,592	0,481	1,181
Desvio Padrão	0,491	0,468	0,229	0,396

TABELA 33 - VALORES DOS PARÂMETROS DA TRANSFORMAÇÃO DLT E SEUS DESVIOS PADRÃO

Parâmetros da transformação DLT e suas precisões (m) (18 pontos)		
Parâmetros	Valores dos Parâmetros	Precisões
L ₁	0,9913101	0,0061491
L ₂	0,0043733	0,0008060
L ₃	-0,6345695	0,0677276
L ₄	7574,5700000	17,8839683
L ₅	-0,0051501	0,0008123
L ₆	0,992773	0,0064390
L ₇	-0,3455685	0,0593255
L ₈	6906,708	17,0642451
L ₉	-0,0000001	0,0000001
L ₁₀	0,0000000	0,0000001
L ₁₁	-0,0000071	0,0000083

TABELA 34 - VALORES DOS PARÂMETROS DA ORIENTAÇÃO EXTERIOR CALCULADOS PELA TRANSFORMAÇÃO DLT

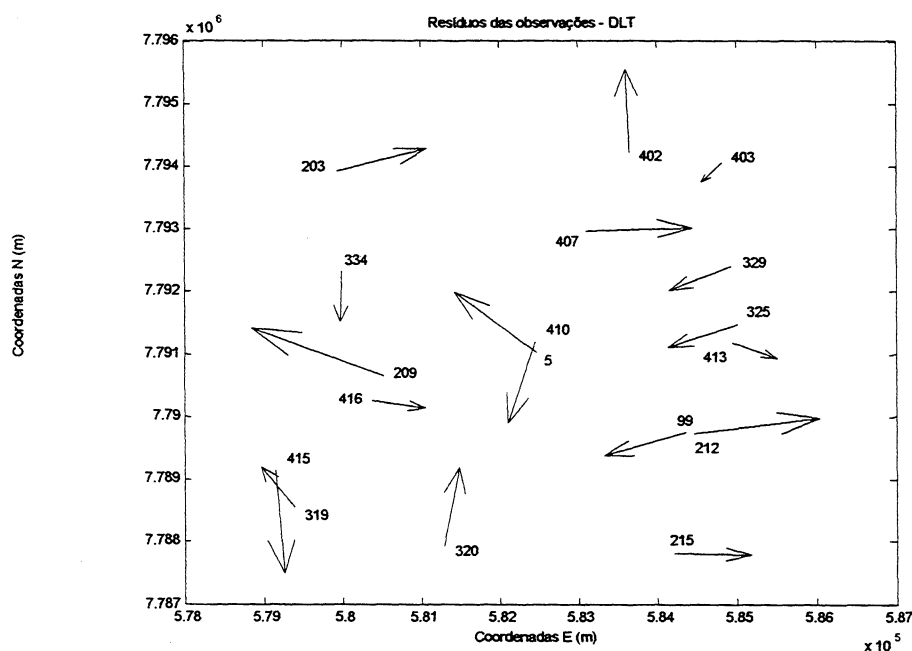
Parâmetros da Orientação Exterior Determinados pelo modelo DLT	
Distância focal em x	166441,97
Distância focal em y	148650,294
Coordenada do ponto principal em x	88729,948
Coordenada do ponto principal em y	48315,372
Parâmetro $\Phi(^{\circ})$	0,408
Parâmetro $\Omega(^{\circ})$	-0,226
Parâmetro $\kappa(^{\circ})$	32,217
Parâmetro X_0	82213,016
Parâmetro Y_0	42432,126
Parâmetro Z_0	140660,302

Os resultados apresentados nas tabelas 32 mostram que a transformação DLT conseguiu modelar as diferenças físicas entre os referenciais da imagem e do espaço objeto, com precisão de 0,396m, ou seja, menos de meio (0,5m) *pixel* que é o valor determinado como precisão de uma observação, conforme descrito no item 4.3.

Os valores individuais e a média dos resíduos das observações – coluna 5 da tabela 32 - são inferiores ao valor determinado para o PEC – 12,5m. O desvio padrão das observações – coluna 5 – é inferior ao valor do desvio padrão apresentado na tabela 8 – 7,5m.

Representando-se graficamente o comportamento dos resíduos planimétricos na figura 28, pode-se inferir que há uma tendência nos resíduos das observações a se concentrar na região SW do referido gráfico. Esta concentração de pontos em determinada região não estava presente no ajustamento deste modelo – DLT com a aplicação de 9 pontos de apoio. No entanto, esta tendência sistemática foi minimizada neste modelo, se comparados com os modelos Afim e Projetivo. Diante do exposto, pode-se concluir que o aumento no número de pontos de apoio no ajustamento aumentou a tendência sistemática.

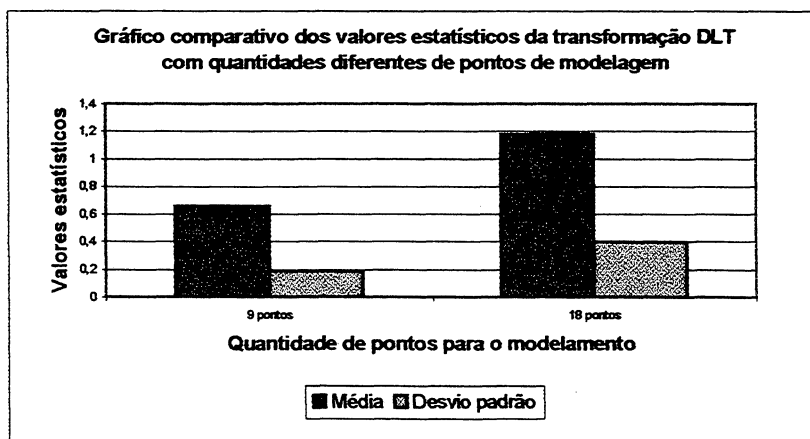
FIGURA 28 - RESÍDUOS DOS PONTOS DE APOIO NA TRANSFORMAÇÃO DLT



Os valores das médias e desvios padrão das tabelas 29 e 32 encontrados no ajustamento por mínimos quadrados empregando nove e dezoito pontos de apoio, estão representados na figura 29.

Observando-se os valores estatísticos de média e de desvio padrão dos resíduos das observações, presentes na tabela 32, verifica-se que a densificação do número de pontos de apoio, aplicados ao ajustamento, diminuiu a acurácia e a precisão das observações calculadas pelo modelo DLT. Os percentuais de degeneração da acurácia e da precisão que ocorreram com a densificação de pontos de apoio, foram 80% e 112,9%, respectivamente. No entanto, os valores do desvio padrão dos parâmetros de translação, entre outros parâmetros, apresentados nas tabelas 29 e 32, diminuíram.

FIGURA 29 - VALORES ESTATÍSTICOS RESULTANTES DO MODELAMENTO COM 9 E 18 PONTOS E TRANSFORMAÇÃO DLT



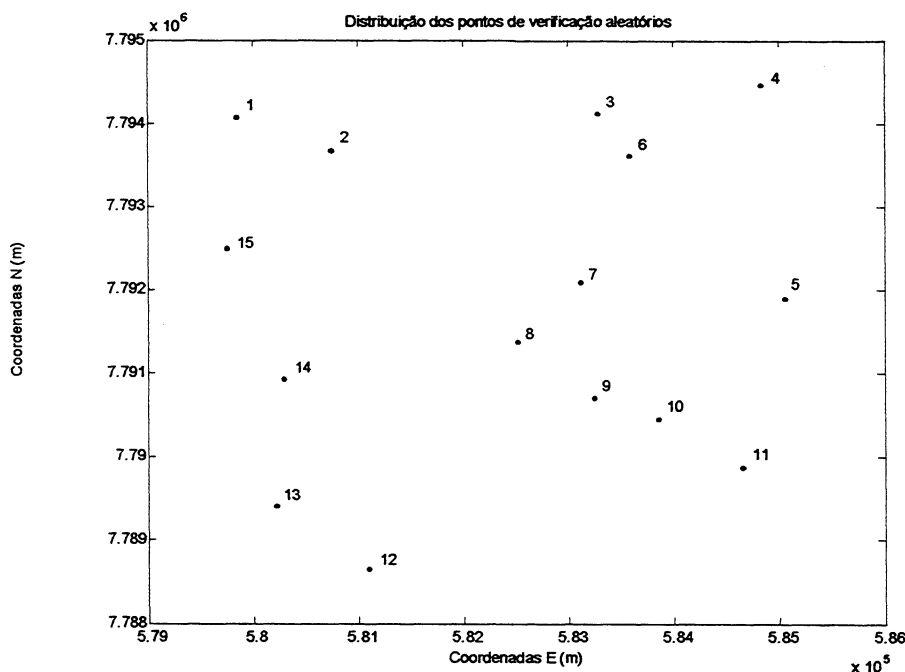
Desta forma, pode-se concluir que a acurácia e a precisão das observações no ajustamento para a determinação dos parâmetros, com nove pontos de apoio e modelo DLT, foram maiores do que a acurácia e a precisão obtidas no ajustamento com dezoito pontos de apoio.

4.3.3.2 Análise das discrepâncias nos pontos de verificação aleatórios provenientes da monorrestituição com a aplicação da transformação DLT

Os pontos de verificação aleatórios são pontos que representam as diversas entidades gráficas - interseção de quarteirões, caminhos, ruas e estradas - do mapa de atualização monorestituídos e distribuídos sobre a área da imagem, conforme figura 30.

Determinados os 11 parâmetros da transformação DLT, com o emprego de 9 e 18 pontos de apoio, o mapa de atualização no referencial da imagem foi transformado para o referencial do terreno com a aplicação do modelo DLT, na sua forma inversa – equação 2.9 – e do DTM. As informações altimétricas utilizadas no DTM foram provenientes do mapa digital na escala de 1:25000 e da carta digital na escala de 1:2000, cujas equidistâncias das curvas de nível foram de dez e um metro. Desta forma, foram gerados quatro arquivos de atualização cartográfica, com precisões diferentes.

FIGURA 30 - DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO ALEATÓRIOS



As avaliações dos pontos de verificação aleatórios foram organizadas, segundo o número de pontos de apoio empregados no ajustamento para a altimetria proveniente das curvas de nível com equidistância de um metro. O melhor resultado determinou o número de pontos de apoio da metodologia de atualização para o modelo matemático DLT.

Dos arquivos de atualização cartográfica retificados foram selecionados quinze pontos e as coordenadas planimétricas destes pontos foram comparadas às coordenadas planimétricas da carta na escala de 1:2000, consideradas como exatas.

Os pontos de verificação aleatórios que foram avaliados estão dispostos na tabela 35 que apresenta as discrepâncias planimétricas do mapa de atualização retificado, empregando nove pontos de apoio no ajustamento por mínimos quadrados, altimetria proveniente da carta digital na escala de 1:2000, ou seja, com equidistância de 1m e modelo matemático DLT.

TABELA 35 – DISCREPÂNCIAS DAS COORDENADAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO ALEATÓRIOS DO MAPA DE ATUALIZAÇÃO

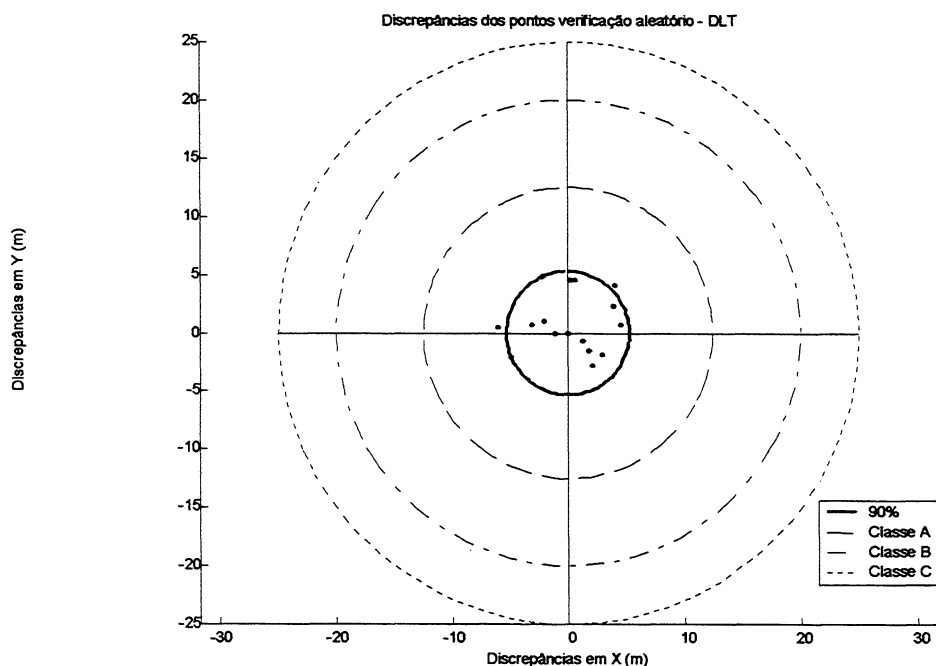
Discrepâncias da transformação DLT nos pontos aleatórios (m)			
Pontos	ΔE	ΔN	ΔR
1	3,998	4,139	5,754
2	-2,042	1,044	2,293
3	1,840	-1,550	2,406
4	-4,858	-2,056	5,275
5	2,960	-1,860	3,496
6	1,257	-0,654	1,416
7	2,078	-2,811	3,495
8	-2,160	4,860	5,318
9	4,617	0,734	4,675
10	0,660	4,522	4,570
11	3,930	2,320	4,564
12	0,240	4,580	4,586
13	-3,106	0,689	3,181
14	-1,070	-0,010	1,070
15	-6,045	0,460	6,062
Média	0,153	0,960	3,878
Média absoluta	2,724	2,153	3,878
Desvio Padrão	1,685	1,665	1,554

A figura 31 representa as discrepâncias das coordenadas planimétricas dos pontos de verificação aleatórios da tabela 35 e os círculos definidores das classes de qualidade.

Os valores das discrepâncias apresentadas na tabela 35 mostram que o modelo matemático DLT conseguiu minimizar as distorções geométricas existentes na imagem (vide item 2.4.3), não só nos pontos de modelagem como, também, nos pontos de verificação de escolha aleatória, distribuídos sobre toda a imagem.

Analisando-se a distribuição das discrepâncias planimétricas na figura 31, verifica-se a existência de um erro sistemático no conjunto, pois a distribuição não ocorre em todos os quadrantes, concentrando-se nos quadrantes NO, SE e NE.

FIGURA 31 - DISCREPÂNCIAS DAS COORDENADAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO ALEATÓRIOS DO MAPA DE ATUALIZAÇÃO



Analisando-se estatisticamente os valores das discrepâncias resultantes da tabela 35, considerando-as, para isso, como uma amostra de distribuição normal, estabeleceu-se para a verificação das classes de qualidade o teste de Student.

Desta forma, para verificar se a qualidade da atualização empregando o processo de monorrestituição de imagem IKONOS com o modelo DLT, com altimetria proveniente de curvas de nível com equidistância de 1m e nove pontos de apoio, pertence a classe A, formulou-se a seguinte hipótese:

$$H_0: \mu \leq 12,5;$$

$$H_1: \mu > 12,5;$$

O valor de t calculado foi de -21,4913. O valor encontrado na tabela para um nível de significância de 10% e grau de liberdade de 14 foi de 1,345. Comparando o valor calculado com o valor tabelado têm-se: $-21,4913 < 1,345$. Portanto, a hipótese H_0 foi aceita para um nível de confiança de 90%. A atualização cartográfica empregando monorrestituição de imagem IKONOS com o modelo DLT, com altimetria proveniente de curvas de nível com equidistância de 1m e nove pontos de apoio pertence a classe A, no quesito acurácia.

Para avaliar a precisão da atualização cartográfica, empregando o sistema de monorrestituição de imagem IKONOS com o modelo DLT, com altimetria proveniente de curvas de nível com equidistância de 1m e nove pontos de apoio, realizou-se o teste de hipótese onde $H_0: \sigma^2 \leq \text{erro padrão (elevado ao quadrado)}$ das diversas classes e a hipótese $H_1: \sigma^2 > \text{erro padrão (elevado ao quadrado)}$ das classes (A,B,C).

Neste teste usou-se a equação 4.4 que emprega a variância que se relaciona com a distribuição Qui Quadrado (χ^2).

Formulando a hipótese para a precisão na classe A têm-se:

$$H_0: \sigma^2 \leq 3,3\text{m};$$

$$H_1: \sigma^2 > 3,3\text{m};$$

$$\alpha = 0,1$$

$$\chi^2_{\alpha} = 21,06 \text{ (tabelado)}$$

O valor encontrado para a estatística amostral calculada foi de 0,6010. Fazendo-se a comparação $\chi^2 = 0,6010 < \chi^2_{\alpha} = 21,06$ verifica-se que a hipótese H_0 foi aceita, para um de significância de 10%, portanto a precisão planimétrica da atualização cartográfica se encontra na classe A.

Concluindo pode-se afirmar que a atualização cartográfica empregando monorrestituição de de imagem IKONOS com o modelo DLT, com altimetria proveniente de curvas de nível com equidistância de 1m e nove pontos de apoio, possui classe A.

Para avaliar a influência do número de pontos de apoio sobre a qualidade dos pontos de verificação aleatórios das feições cartográficas, foram coletadas as coordenadas dos pontos de verificação do mapa de atualização retificados com parâmetros determinados pelo ajustamento com 18 pontos de apoio, técnica dos mínimos quadrados, método paramétrico com injunção de posição e informações altimétricas provenientes de curvas de nível com equidistância de 1m. As discrepâncias entre as coordenadas da carta na escala de 1:2000 e as coordenadas coletadas são apresentadas na tabela 36.

TABELA 36 - DISCREPÂNCIAS DAS COORDENADAS DOS PONTOS ALEATÓRIOS DO MAPA DE ATUALIZAÇÃO

Discrepâncias nos pontos aleatórios da transformação DLT			
Pontos	ΔE (m)	ΔN (m)	ΔR (m)
1	4,018	4,728	6,204
2	-0,868	1,107	1,407
3	1,310	-0,610	1,445
4	-4,854	-2,219	5,337
5	2,620	-1,730	3,140
6	1,137	-0,254	1,165
7	2,178	-2,781	3,533
8	-2,958	5,674	6,399
9	4,407	0,343	4,420
10	0,570	4,562	4,597
11	4,270	1,720	4,603
12	-0,550	5,020	5,050
13	-3,021	1,317	3,295
14	0,260	0,220	0,341
15	-1,275	0,345	1,321
Média	0,483	1,163	3,484
Média absoluta	2,286	2,175	3,484
Desvio Padrão	1,570	1,925	1,959

Observando-se a tabela 36, verifica-se que a média e o desvio padrão das discrepâncias resultantes são inferiores aos valores determinados para o PEC (12,5m) e para o erro padrão (7,5m), apresentados na tabela 8.

Analisando-se estatisticamente os valores das discrepâncias resultantes da tabela 36, considerando-as, para isso, como uma amostra de distribuição normal, estabeleceu-se para a verificação das classes de qualidade o teste de Student.

Desta forma, para verificar se a qualidade da atualização empregando o processo de monorrestituição de imagem IKONOS com o modelo DLT, com altimetria proveniente de curvas de nível com eqüidistância de 1m e 18 pontos de apoio, pertence a classe A, formulou-se a seguinte hipótese:

$$H_0: \mu \leq 12,5;$$

$$H_1: \mu > 12,5;$$

O valor de t calculado foi de -17,8279 O valor encontrado na tabela para um nível de significância de 10% e grau de liberdade de 14 foi de 1,345. Comparando o valor calculado com o valor tabelado têm-se: $-17,8279 < 1,345$. Portanto, a hipótese H_0 foi aceita para um nível de confiança de 90%. A atualização cartográfica empregando monorrestituição de imagem IKONOS com o modelo DLT, com altimetria

proveniente de curvas de nível com equidistância de 1m e 18 pontos de apoio pertence a classe A, no quesito acurácia.

Para avaliar a precisão da atualização cartográfica, empregando o sistema de monorrestituição de de imagem IKONOS com o modelo DLT, com altimetria proveniente de curvas de nível com equidistância de 1m e 18 pontos de apoio, realizou-se o teste de hipótese onde $H_0: \sigma^2 \leq \text{erro padrão (elevado ao quadrado)}$ das diversas classes e a hipótese $H_1: \sigma^2 > \text{erro padrão (elevado ao quadrado)}$ das classes (A,B,C).

Neste teste usou-se a equação 4.4 que emprega a variância que se relaciona com a distribuição Qui Quadrado (χ^2).

Formulando a hipótese para a precisão na classe A têm-se:

$$H_0: \sigma^2 \leq 3,3m;$$

$$H_1: \sigma^2 > 3,3m;$$

$$\alpha = 0,1$$

$$\chi^2_{\alpha} = 21,06 \text{ (tabelado)}$$

O valor encontrado para a estatística amostral calculada foi de 0,9549. Fazendo-se a comparação $\chi^2 = 0,9549 < \chi^2_{\alpha} = 21,06$ verifica-se que a hipótese H_0 foi aceita, para um de significância de 10%, portanto a precisão planimétrica da atualização cartográfica se encontra na classe A.

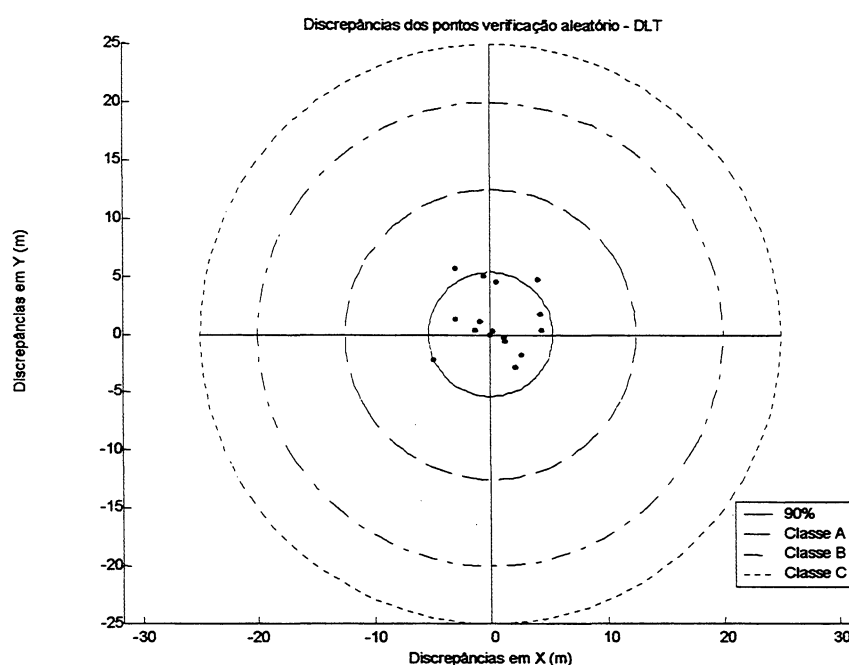
Concluindo pode-se afirmar que a atualização cartográfica empregando monorrestituição de imagem IKONOS com o modelo DLT, com altimetria proveniente de curvas de nível com equidistância de 1m e 18 pontos de apoio, possui classe A.

Observando-se a distribuição das discrepâncias na figura 32, verifica-se a existência de um erro sistemático no conjunto, pois a distribuição não se dá em todos os quadrantes, concentrando-se nos quadrantes NO, SE e NE.

Analisando-se a influência do aumento do número de pontos de apoio no ajustamento, verifica-se que houve um aumento na acurácia dos pontos de verificação aleatórios de 43,91%, pois o valor da média das discrepâncias resultantes - coluna 4 da tabela 36 - é inferior ao valor da média das discrepâncias da tabela 35. No entanto,

não houve aumento na precisão dos pontos de verificação porque o desvio padrão da tabela 36 é superior ao desvio padrão das discrepâncias da tabela 35. A degeneração da precisão do mapa de atualização, empregando 18 pontos de apoio, foi de 26,06%.

FIGURA 32 - DISCREPÂNCIAS DAS COORDENADAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO ALEATÓRIOS DO MAPA DE ATUALIZAÇÃO

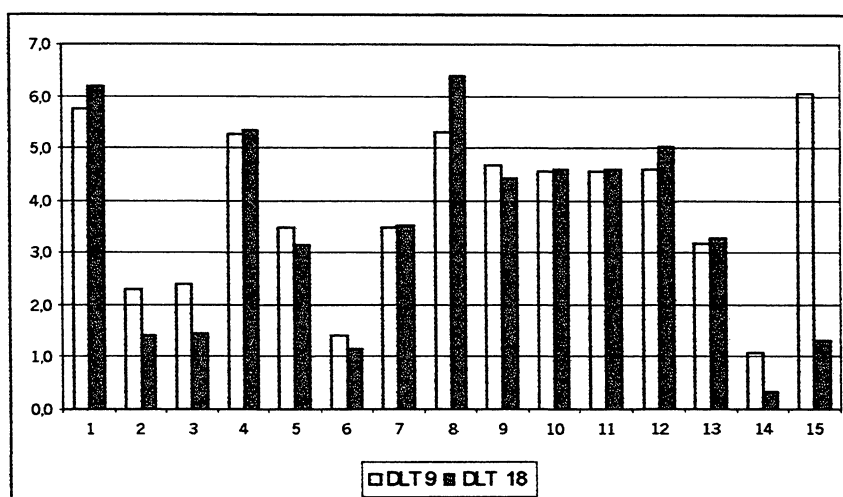


Comparando-se os valores individuais das discrepâncias (coluna 4 das tabelas 35 e 36) dos pontos de verificação aleatórios do mapa de atualização retificado com nove e dezoito pontos de apoio, vide figura 33, observa-se que, em sete pontos de verificação, houve redução no valor da sua discrepância, o que representa um percentual aproximadamente de 50%. Verifica-se também, que esta redução não é igual em todos os pontos.

Desta forma, pode-se concluir que o aumento do número de pontos no ajustamento aumenta a acurácia do mapa de atualização, mas não aumenta a precisão, o que significa que diminui a coerência interna dos elementos do mapa. O aumento de 100% no número de pontos de apoio (nove para dezoito pontos) não é proporcional ao aumento da acurácia - 43,91%. Levando-se em conta que o aumento do número de pontos de apoio não atendeu ao requisito de aumento da precisão e acurácia da carta,

em contrapartida ao aumento do tempo operacional que isto acarretou à metodologia. Considerou-se que o número de pontos ótimo para a retificação dos dados vetoriais da metodologia de atualização com imagem IKONOS, com a transformação DLT, técnica dos mínimos quadrados e modelo paramétrico com injunção de posição, foi de nove pontos.

FIGURA 33 – DISCREPÂNCIAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO ALEATÓRIOS



Uma vez definido que para as condições anteriormente apresentadas o número de pontos de apoio ótimo foi de nove pontos, prosseguiu-se com o estudo da altimetria na metodologia de atualização cartográfica para mapas municipais, integrando imagem IKONOS e aerofotos por meio da técnica de monorrestituição digital.

A tabela 37 apresenta as discrepâncias dos pontos de verificação aleatórios do mapa de atualização, retificado com a transformação DLT empregando 9 pontos de apoio no ajustamento e informações altimétricas provenientes de curvas de nível com equidistância de 10 metros.

TABELA 37 - DISCREPÂNCIAS DAS COORDENADAS DOS PONTOS ALEATÓRIOS DO MAPA DE ATUALIZAÇÃO

Discrepâncias nos pontos aleatórios da transformação DLT			
Pontos	ΔE (m)	ΔN (m)	ΔR (m)
1	9,877	6,419	11,780
2	-3,875	0,357	3,892
3	2,800	-1,150	3,027
4	-5,585	-2,479	6,110
5	0,970	-2,810	2,973
6	1,997	-0,334	2,025

continua

Discrepâncias nos pontos aleatórios da transformação DLT			
Pontos	ΔE (m)	ΔN (m)	ΔR (m)
7	3,804	-2,025	4,309
8	-7,780	2,260	8,102
9	9,677	3,183	10,187
10	1,690	5,042	5,318
11	5,240	3,000	6,038
12	6,890	7,940	10,513
13	0,733	2,629	2,730
14	0,920	0,890	1,280
15	-6,834	-0,202	6,837
Média	1,368	1,515	5,675
Média absoluta	4,578	2,715	5,675
Desvio Padrão	3,124	2,249	3,267

Analisando-se a tabela 37, verifica-se que a discrepância planimétrica de 100% dos pontos de verificação é inferior a 12,5m. Os valores da média e do desvio padrão são inferiores aos valores determinados para o PEC e para o desvio padrão, presentes na tabela 8.

Analisando-se estatisticamente os valores das discrepâncias resultantes da tabela 37, considerando-as, para isso, como uma amostra de distribuição normal, estabeleceu-se para a verificação das classes de qualidade o teste de Student.

Desta forma, para verificar se a qualidade da atualização empregando o processo de monorrestituição de imagem IKONOS com o modelo DLT, com altimetria proveniente de curvas de nível com equidistância de 10m e 9 pontos de apoio, pertence a classe A, formulou-se a seguinte hipótese:

$$H_0: \mu \leq 12,5;$$

$$H_1: \mu > 12,5;$$

O valor de t calculado foi de -8,0921. O valor encontrado na tabela para um nível de significância de 10% e grau de liberdade de 14 foi de 1,345. Comparando o valor calculado com o valor tabelado têm-se: $-8,0921 < 1,345$. Portanto, a hipótese H_0 foi aceita para um nível de confiança de 90%. A atualização cartográfica empregando monorrestituição de imagem IKONOS com o modelo DLT, com altimetria proveniente de curvas de nível com equidistância de 10m e 9 pontos de apoio pertence a classe A, no quesito acurácia.

Para avaliar a precisão da atualização cartográfica, empregando o sistema de monorrestituição de imagem IKONOS com o modelo DLT, com altimetria proveniente de curvas de nível com equidistância de 10m e 9 pontos de apoio, realizou-se o teste de hipótese onde $H_0: \sigma^2 \leq \text{erro padrão (elevado ao quadrado)}$ das diversas classes e a hipótese $H_1: \sigma^2 > \text{erro padrão (elevado ao quadrado)}$ das classes (A,B,C).

Neste teste usou-se a equação 4.4 que emprega a variância que se relaciona com a distribuição Qui Quadrado (χ^2).

Formulando a hipótese para a precisão na classe A têm-se:

$$H_0: \sigma^2 \leq 3,3\text{m};$$

$$H_1: \sigma^2 > 3,3\text{m};$$

$$\alpha = 0,1$$

$$\chi^2_{\alpha} = 21,06 \text{ (tabelado)}$$

O valor encontrado para a estatística amostral calculada foi de 2,6559. Fazendo-se a comparação $\chi^2 = 2,6559 < \chi^2_{\alpha} = 21,06$ verifica-se que a hipótese H_0 foi aceita, para um de significância de 10%, portanto a precisão planimétrica da atualização cartográfica se encontra na classe A.

Concluindo pode-se afirmar que a atualização cartográfica empregando monorrestituição de imagem IKONOS com o modelo DLT, com altimetria proveniente de curvas de nível com equidistância de 10m e 9 pontos de apoio, possui classe A. Pode-se então, afirmar que: os elementos da atualização estão no mesmo padrão de qualidade da base original – Classe A, vide figura 34.

Comparando-se os valores de média e desvio padrão, presentes nas duas tabelas 35 e 37, verifica-se que a acurácia foi reduzida em 46,34% e a precisão em 110,23%. No entanto, esta degeneração na qualidade com a aplicação de uma altimetria com menor precisão não impede a utilização desta fonte altimétrica, com equidistância de 10m, na monorrestituição das informações vetoriais das imagens IKONOS com o modelo matemático DLT, para a atualização cartográfica na escala de 1:25000.

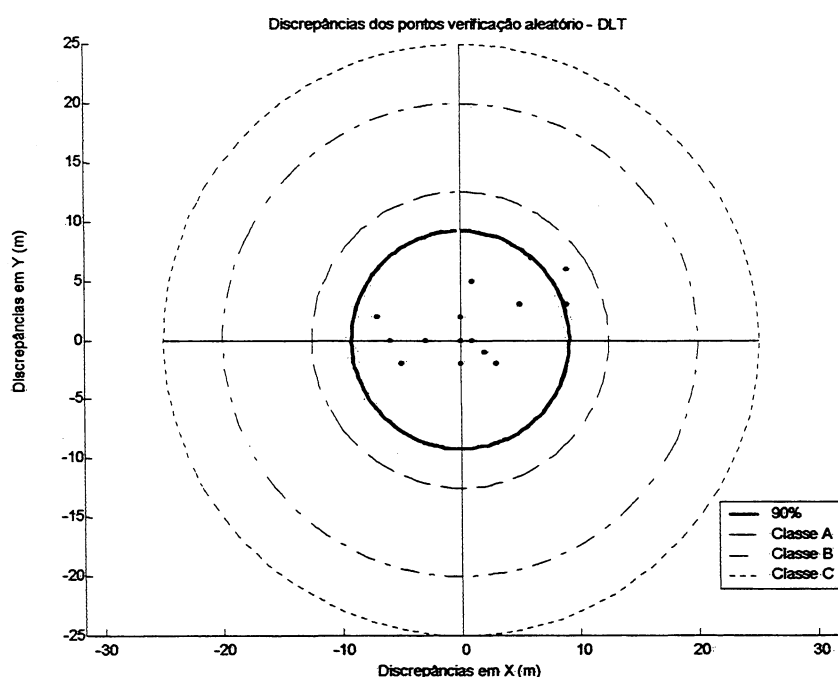
Da mesma forma, a figura 34 representa as discrepâncias nas coordenadas planimétricas (coluna 2 e 3) dos pontos aleatórios da tabela 36 e os círculos

definidores das classes de qualidade, de maneira a facilitar a visualização e análise dos dados.

Analisando-se a figura 34, verifica-se a existência de um erro sistemático no conjunto, pois há uma concentração maior de discrepâncias no quadrante NE –SE, com maiores discrepâncias se apresentando no quadrante NE, onde estas estão mais dispersas.

Comparando-se as figuras 32 e 34, pode-se afirmar que o emprego de informações altimétricas mais precisas não influenciou nos erros sistemáticos encontrados nos pontos de verificação aleatórios.

FIGURA 34 - DISCREPÂNCIAS DAS COORDENADAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO ALEATÓRIOS DO MAPA DE ATUALIZAÇÃO



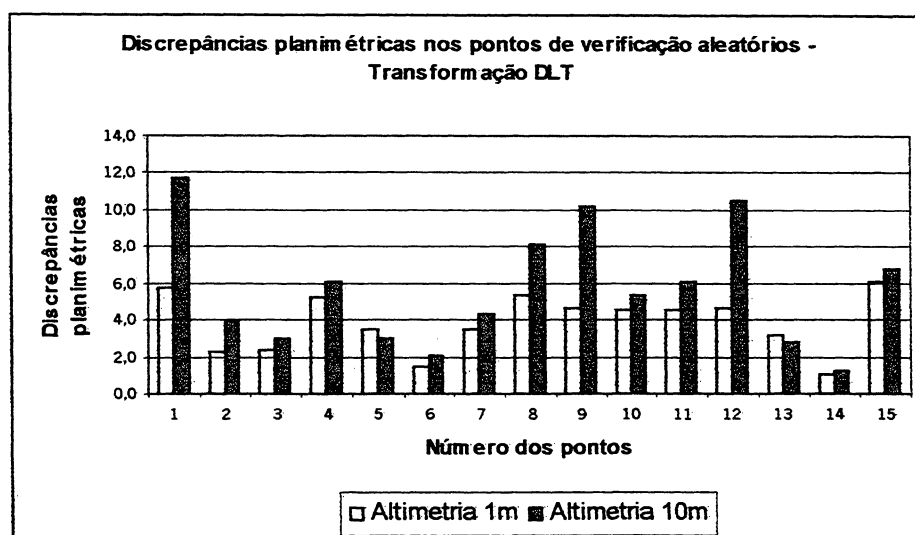
As discrepâncias planimétricas encontradas nos pontos de verificação aleatórios foram comparadas e representadas na figura 35, junto aos valores das discrepâncias resultantes - coluna 4 das tabelas 36 e 37.

Observando-se a figura 35, pode-se dizer que as grandes discrepâncias encontradas nos pontos de verificação do mapa de atualização cartográfica retificado

com altimetria de 10 metros – pontos 1, 8, 9 e 12 – são provenientes da base altimétrica, ou seja, são erros ou desatualizações altimétricas.

Diante do exposto, com relação à altimetria a ser utilizada na metodologia de atualização cartográfica integrando imagem IKONOS e aerofotos na escala de 1:30000, com a técnica de monorrestituição digital e modelo matemático DLT, pode-se concluir que as informações altimétricas do mapa original na escala de 1:25000 com curvas de nível com eqüidistância de 10 metros apresentou resultado satisfatório, pois manteve a qualidade da carta original (classe A).

FIGURA 35 - DISCREPÂNCIAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO ALEATÓRIOS RETIFICADOS COM EQÜIDISTÂNCIA DE 1 E 10 METROS E MODELO DE TRANSFORMAÇÃO DLT



4.3.3.3 Análise das discrepâncias nos pontos definidores das feições cartográficas do mapa de atualização monorestituídas da imagem IKONOS e modelo DLT

Considerando-se que a altimetria proveniente das curvas de nível com eqüidistância de 10m foi satisfatória para a metodologia de atualização cartográfica em questão, prosseguiu-se o estudo da precisão do modelo DLT em diversas feições cartográficas. A metodologia de avaliação da precisão destas feições foi esquematizada conforme descrita no item 4.2.5. As análises foram realizadas sobre valores da média e desvio padrão de cada feição cartográfica do mapa de atualização

cartográfica, retificado com altimetria proveniente de curvas de nível, com equidistância 10m, empregando nove pontos de apoio no cálculo dos parâmetros. A tabela 38 apresenta o resumo do resultado estatístico de diferentes feições cartográficas do mapa retificado com a transformação DLT, ajustadas com nove pontos de apoio e informações altimétricas provenientes de curvas de nível de dez metros, conforme representação gráfica na figura 36.

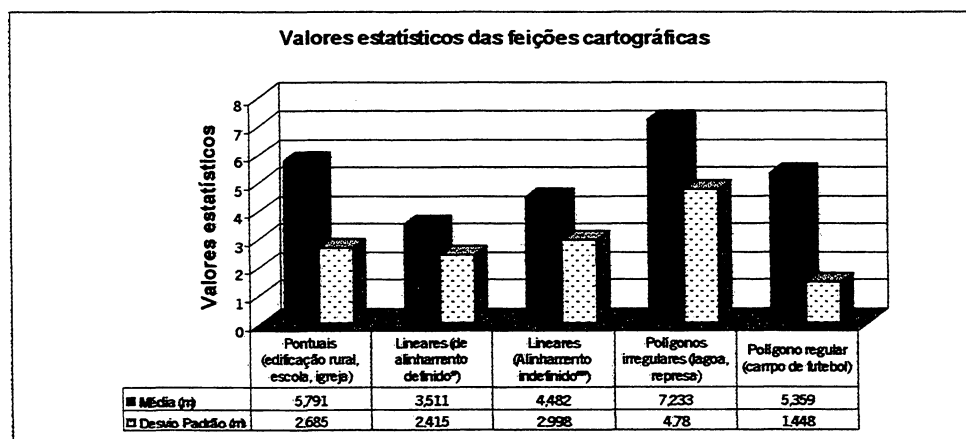
TABELA 38 – RESUMO DO RESULTADO ESTATÍSTICO DE DIFERENTES FEIÇÕES CARTOGRÁFICAS DO MAPA DE ATUALIZAÇÃO CARTOGRÁFICA RETIFICADO COM A TRANSFORMAÇÃO DLT

Feições cartográficas	Número de pontos	Média (m)	Desvio Padrão (m)
Pontuais (edificação rural, escola, igreja)	20	5,791	2,685
Lineares (de alinhamento definido*)	13	3,511	2,415
Lineares (Alinhamento indefinido**)	13	4,482	2,998
Polígonos irregulares (lagoa, represa)	7 (polígonos)	7,233	4,780
Polígono regular (campo de futebol)	16 (4 polígonos)	5,359	1,448

* referem-se às estradas pavimentadas e arruamentos com revestimento sólido;

** referem-se às estradas sem pavimentação, de leito natural e arruamentos sem revestimento ou com revestimento solto.

FIGURA 36 - VALORES ESTATÍSTICOS DE MÉDIA E DESVIO PADRÃO DAS FEIÇÕES CARTOGRÁFICAS RETIFICADAS COM A TRANSFORMAÇÃO DLT



Analisando-se os valores estatísticos da média e desvio padrão das feições cartográficas, segundo suas características de representação, pode-se afirmar que o comportamento dos polígonos irregulares representativos de lagoas e represas apresentou uma maior discrepância média em relação às demais feições, devido à

influência da estação do ano no volume de água destas feições, época da tomada da imagem, o que acarretou modificação no traçado e, conseqüentemente, deslocamento nos centróides destes polígonos, considerados como referência para a avaliação dos polígonos irregulares.

O resultado apresentado para os elementos pontuais deve-se, da mesma forma que explicado no item 4.2.5, à diferença existente entre a altitude real (edificação mais altitude do terreno) e a apresentada pelo DTM.

As feições lineares de alinhamento indefinido possuem discrepâncias médias superiores à média do alinhamento definido, por terem, muitas vezes, seu traçado influenciado pela cobertura vegetal das bordas das feições na imagem, ou mesmo por sofrerem modificações em seu traçado (caso das estradas de leito natural) nos procedimentos de recuperação de suas vias, que impedem a determinação exata do alinhamento. No entanto, a precisão deste alinhamento ficou bem próxima à precisão do alinhamento definido porque muitas destas feições (estradas de leito natural e sem pavimentação) são representadas por seu eixo central.

As feições lineares de alinhamento definido foram as feições que apresentaram uma discrepância média menor porque o erro de observação, na restituição das mesmas, foram minimizados pelas formas bem definidas dos elementos.

O polígono regular por ter forma geométrica bem definida deveria ter média e desvio padrão bem próximos aos do alinhamento definido. No entanto, a média do polígono regular ficou acima da média do alinhamento definido (vide figura 38), devido à ocorrência de erro altimétrico em dois pontos dos dezesseis pontos definidores da feição. Quanto à precisão das feições de polígono regular, pode-se dizer que: a forma bem definida da feição - campo de futebol - associado ao contraste radiométrico dos elementos de vizinhança, contribuiu para a melhor determinação do traçado. A discrepância elevada em dois pontos não influenciou na precisão, pois os demais elementos – quatorze pontos - dos campos considerados na avaliação possuíam discrepâncias mínimas.

Considerando-se todas as médias e desvio padrão das discrepâncias das feições cartográficas constantes na tabela 38, pode-se afirmar que o modelo matemático DLT aplicado à metodologia de atualização cartográfica, integrando imagem de alta resolução e aerofotos na escala de 1:30000, com a técnica de monorrestituição, nas condições de ajustamento empregando nove pontos de apoio e altimetria proveniente de mapa com equidistância de 10m, conseguiu parametrizar as diferenças físicas entre os referenciais, imagem e terreno, dentro da acurácia e precisão determinados para a classe A, conforme tabela 8.

4.3.4 Verificação da metodologia de atualização cartográfica de mapas municipais, com a técnica de monorrestituição de imagem de satélite - IKONOS - empregando a transformação APM

O modelo matemático APM (vide item 2.9.4) é uma transformação que relaciona o espaço R3 e o plano R2 e é um caso particular da projeção central onde o centro de projeção foi deslocado para o infinito (LUGNANI, 1987). Sendo assim, os elementos da superfície do terreno com coordenadas tridimensionais (X,Y,Z) pertencentes ao espaço R3 foram projetados na imagem IKONOS que representa o plano R2 com coordenadas (x,y).

A forma de captura da imagem IKONOS, linha a linha, determina uma projeção central, no sentido transversal de varredura (vide item 3.2.7.2), uma projeção paralela na direção longitudinal de varredura, e a grande distância existente entre a imagem e o objeto (681km) permitem assumir que o centro de projeção está no infinito. Desta forma, a projeção da imagem pode ser aproximada da projeção paralela.

Devido à dificuldade de se corrigir linha a linha, descrita no item 3.2.6.2, as deformações geométricas existentes na imagem IKONOS (vide item 3.2.7.2), os parâmetros foram considerados constantes e o movimento do satélite foi considerado linear sobre toda a área de estudo imageada da imagem IKONOS – 7092x7092pixels.

Da mesma forma que o modelo DLT, o modelo APM foi empregado nesta pesquisa, com 9 e 18 pontos de apoio para o cálculo dos parâmetros e com diferentes fontes altimétricas (curvas de nível com equidistância de 1 e 10 metros) para a

retificação das feições cartográficas da atualização monorestituídas. Os resultados conseguidos no ajustamento com 9 e 18 pontos de apoio estão representados a seguir.

4.3.4.1 Verificação da aplicação de 9 e 18 pontos de apoio no ajustamento com a técnica dos mínimos quadrados e transformação APM na monorrestituição da imagem IKONOS

O modelo matemático APM foi empregado para transformar as observações no referencial do plano gráfico para o referencial do terreno. Para isso, foi necessário se determinar os parâmetros de transformação. A determinação dos parâmetros de transformação foi realizada com a transformação APM na sua forma direta (vide equação 3.1), pontos de apoio e pontos “fotogramétricos” (imagem). O número de pontos de apoio aplicado nesta transformação foi igual a nove, embora o modelo matemático exija quatro pontos para solução mínima. Estes valores foram especificados para compatibilizarem-se com o número de pontos de apoio empregado na transformação DLT. A superabundância de observações requer a aplicação da técnica de ajustamento por mínimos quadrados e método paramétrico com injeção de posição. O resultado deste ajustamento para a determinação dos parâmetros, empregando 9 pontos de apoio, apresentou os valores descritos nas tabelas 39 e 40.

TABELA 39 - RESÍDUOS DAS OBSERVAÇÕES, NO REFERENCIAL DO TERRENO, DO MODELO DE APM

Transformação APM				
Pontos	V_x (m)	V_y (m)	V_z (m)	R_{xyz} (m)
5	-0,939	-0,212	0,617	1,143
203	0,213	-0,614	0,049	0,652
215	0,084	0,081	-0,073	0,137
319	0,016	0,413	-0,127	0,432
320	-0,034	0,514	-0,126	0,530
325	0,544	-1,161	0,009	1,282
402	0,071	1,284	-0,408	1,349
403	-0,219	0,220	0,067	0,318
416	0,264	-0,525	0,007	0,588
Média absoluta	0,265	0,558	0,165	0,715
Desvio padrão	0,301	0,415	0,208	0,438

TABELA 40 - VALORES DOS PARÂMETROS DA TRANSFORMAÇÃO APM – E SEUS DESVIOS PADRÃO

Parâmetros da transformação APM e suas precisões		
Parâmetros	Valores dos Parâmetros	Precisões
A ₁	0,9984024	0,0003760
A ₂	0,0047391	0,0002575
A ₃	-0,5929966	0,0265151
A ₄	7589,4862667	21,1374695
A ₅	-0,0050210	0,0003537
A ₆	0,9995901	0,0002423
A ₇	-0,2820732	0,0249461
A ₈	6900,4645405	19,8867290

Os resultados apresentados na tabela 38 mostram que a transformação APM conseguiu modelar as diferenças físicas entre os referenciais da imagem e do espaço objeto com precisão de 0,438m, ou seja, inferiores ao meio *pixel* que é o valor determinado como a precisão de uma observação, conforme descrito no item 4.3..

Os valores individuais e a média dos resíduos das observações – coluna 5 da tabela 39 – são inferiores ao determinado para o PEC – 12,5m – para a escala 1:25000. O desvio padrão dos resíduos das observações (coluna 5) é inferior, também ao valor determinado para o desvio padrão – 7,5m – para a escala em questão (vide tabela 8).

Representando-se espacialmente os valores dos resíduos planimétricos das observações, figura 37, pode-se observar o seu comportamento.

A representação espacial dos vetores resultantes dos resíduos planimétricos das observações da figura 37, permite dizer que os erros sistemáticos presentes no modelo Afim e Projetivo foram minimizados com esta transformação matemática, pois a deformação sistemática diagonal não está presente neste ajustamento. Considerou-se que a introdução da correção referente ao relevo permitiu um melhor tratamento a esta deformação.

Da mesma forma que no modelo DLT, aumentou-se para dezoito o número de pontos de apoio, para determinar os parâmetros conforme distribuição apresentada na figura 27. A tabela 39 apresenta os resíduos das observações obtidos na determinação dos parâmetros, com a técnica dos mínimos quadrados, método paramétrico com

injunção de posição e modelo matemático APM. A tabela 40 apresenta os valores dos parâmetros e seu desvio padrão no modelo APM.

FIGURA 37 – RESÍDUOS DAS OBSERVAÇÕES NA TRANSFORMAÇÃO APM

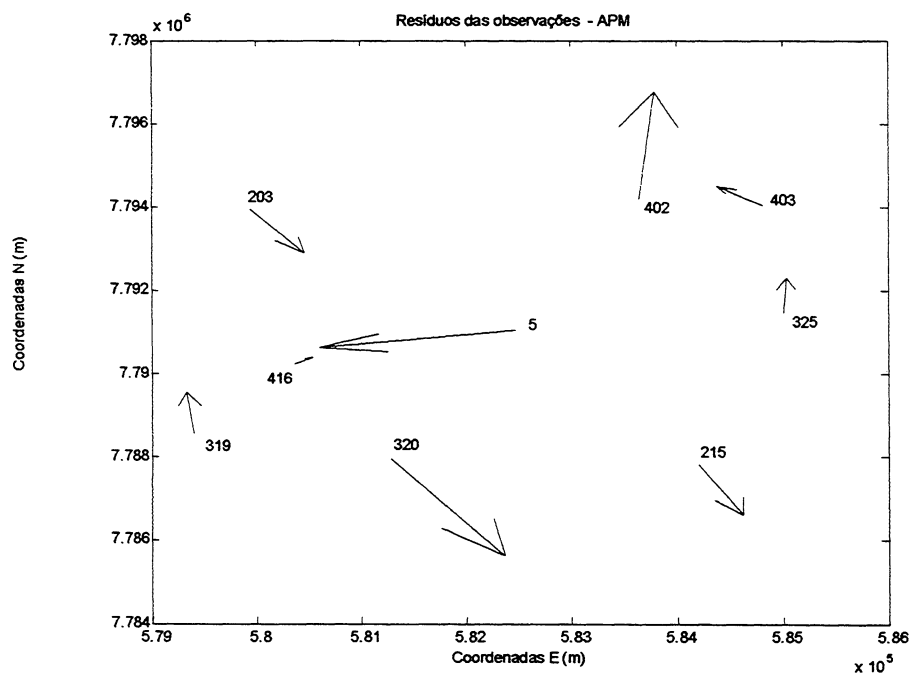


TABELA 41 – RESÍDUOS DAS OBSERVAÇÕES DO MODELO DE TRANSFORMAÇÃO APM

Transformação APM				
Pontos	V _x (m)	V _y (m)	V _z (m)	R _{xyz} (m)
5	-0,780	0,221	0,385	0,897
99	-0,502	-0,463	0,427	0,805
215	0,190	0,182	-0,164	0,310
209	-0,530	0,495	0,159	0,742
212	0,585	-0,049	-0,323	0,670
410	-0,454	-0,880	0,523	1,120
413	0,634	-0,404	-0,246	0,791
415	0,160	-0,715	0,119	0,742
416	0,257	-0,051	-0,133	0,294
325	0,008	-0,369	0,105	0,384
319	0,035	0,708	-0,230	0,745
320	-0,080	0,764	-0,180	0,789
334	0,279	-0,731	0,055	0,784
407	0,311	0,128	-0,217	0,400
402	-0,174	1,261	-0,273	1,302
403	-0,067	0,220	-0,026	0,231
329	-0,183	-0,111	0,139	0,255
203	0,312	-0,207	-0,119	0,393
Média Absoluta	0,308	0,442	0,212	0,648
Desvio padrão	0,225	0,338	0,132	0,306

TABELA 42 - PARÂMETROS DA TRANSFORMAÇÃO APM COM 18 PONTOS DE MODELAGEM

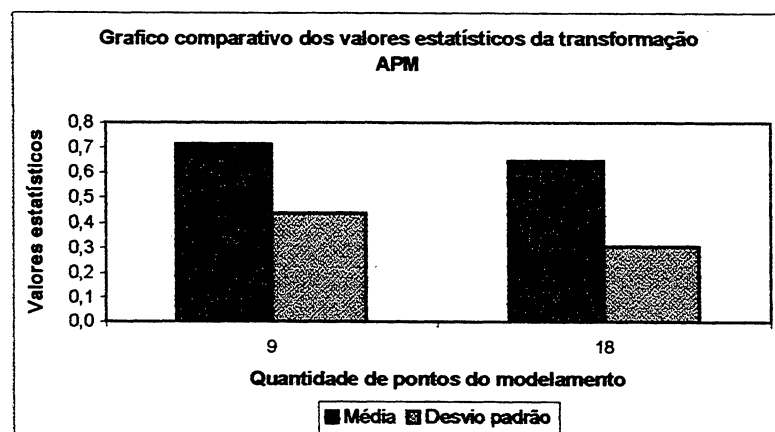
Parâmetros da transformação APM e suas precisões (m)		
Parâmetros	Valores dos Parâmetros	Precisões
A ₁	0,9973075	±0,000196
A ₂	0,0046725	±0,0001516
A ₃	-0.5769174	±0,0117482
A ₄	7569,3233446	±9,3060432
A ₅	-0,00488816	±0,001855
A ₆	0,9986259	±0,0001434
A ₇	-0,2928976	±0,0111143
A ₈	6901,6088966	±8,8038752

Os resultados apresentados na tabela 41 mostram que a transformação APM conseguiu modelar as diferenças físicas entre os referenciais da imagem e do espaço objeto, com precisão de 0,31m, ou seja, inferiores ao meio *pixel* que é o valor determinado como precisão de uma observação, conforme descrito no item 4.3..

Os valores individuais e a média dos resíduos das observações - coluna 5 da tabela 41 - são inferiores ao valor estipulado para o PEC – 12,5m. O desvio padrão das observações – coluna 5 – é inferior ao valor do desvio padrão apresentado na tabela 8.

Comparando-se os valores das médias e desvio padrão das tabelas 39 e 41, vide figura 38, verifica-se que a densificação dos pontos de apoio aplicados ao ajustamento aumentou a acurácia e a precisão das observações determinadas no ajustamento. O percentual de aperfeiçoamento foi de 9,37% e 30,14% para a acurácia e precisão.

FIGURA 38 - VALORES ESTATÍSTICOS RESULTANTES DO MODELAMENTO COM 9 E 18 PONTOS E TRANSFORMAÇÃO APM



Pode-se concluir que a acurácia e a precisão das observações do ajustamento para a determinação dos parâmetros, com 18 pontos de apoio foi maior do que a acurácia e a precisão obtidas no ajustamento com nove pontos de apoio.

4.3.4.2 Análise das discrepâncias nos pontos de verificação aleatórios provenientes da monorrestituição com a aplicação da transformação APM

Os pontos de verificação aleatórios, definidos no item 4.3.3.2 permitiram analisar o comportamento do modelo matemático distantes dos pontos definidores do ajustamento. Considerando-se que foram determinados 8 parâmetros de transformação do modelo APM, com o emprego de 9 e 18 pontos de apoio, o mapa de atualização restituído no referencial da imagem foi transformado para o referencial do terreno com a aplicação do modelo APM, na sua forma inversa – equação 3.3 e do DTM. As informações altimétrica utilizadas no DTM foram provenientes do mapa digital na escala 1:25000 e da carta digital na escala de 1:2000, cujas eqüidistâncias das curvas de nível foram de dez e um metro. Desta forma, foram gerados 4 arquivos de atualização com diferentes precisões.

As avaliações dos pontos de verificação aleatórios foram organizadas, segundo o número de pontos de apoio empregados no ajustamento para a altimetria proveniente das curvas de nível com eqüidistância de um metro. O melhor resultado determinou o número de pontos de apoio da metodologia de atualização para o modelo matemático APM.

Dos arquivos de atualização cartográfica retificados, foram selecionados quinze pontos e as coordenadas planimétricas destes pontos foram comparadas às coordenadas planimétricas da carta na escala de 1:2000, consideradas como exatas.

As discrepâncias planimétricas dos pontos de verificação aleatórios do mapa de atualização retificado, empregando nove pontos de apoio no ajustamento, altimetria proveniente de curvas de nível com eqüidistância de 1m e modelo matemático APM, estão dispostas na tabela 43.

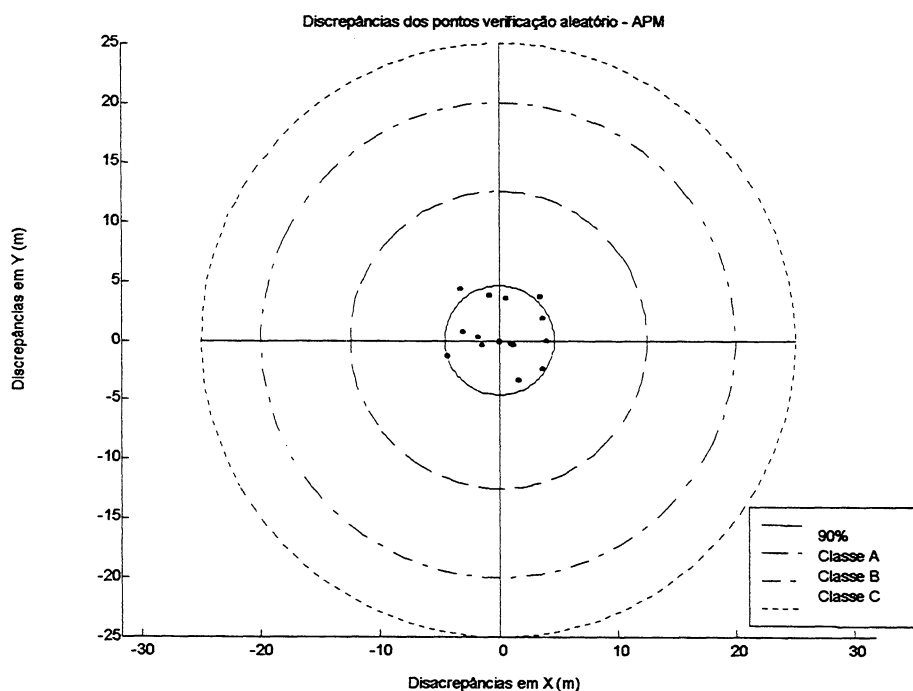
TABELA 43 - DISCREPÂNCIAS DAS COORDENADAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO ALEATÓRIOS DO MAPA DE ATUALIZAÇÃO - TRANSFORMAÇÃO APM

Resíduos da transformação APM nos pontos aleatórios			
Pontos	ΔE (m)	ΔN (m)	ΔR (m)
1	3,409	3,717	5,043
2	-1,844	0,220	1,857
3	1,140	-0,420	1,215
4	-4,418	-1,298	4,605
5	3,660	-2,410	4,382
6	0,907	-0,264	0,944
7	1,612	-3,341	3,710
8	-3,310	4,270	5,403
9	3,917	-0,106	3,918
10	0,480	3,572	3,604
11	3,600	1,850	4,048
12	-0,850	3,780	3,874
13	-3,135	0,743	3,222
14	-0,040	-0,120	0,126
15	-1,465	-0,385	1,515
Média	0,244	0,654	3,164
Média absoluta	2,252	0,654	3,164
Desvio Padrão	1,433	2,327	1,622

A figura 39 apresenta as discrepâncias das coordenadas planimétricas dos pontos de verificação aleatórios da tabela 43 e os seus círculos definidores das classes de qualidade.

Os valores das discrepâncias apresentadas na tabela 42 mostram que o modelo matemático APM conseguiu minimizar as diferenças físicas entre os referenciais, pois a acurácia e a precisão desta transformação ficaram com 3,2m e 1,6m, respectivamente. Os valores individuais das discrepâncias planimétricas representados na figura 39 estão dentro da classe A de qualificação em um percentual de 100% dos pontos amostrados.

FIGURA 39 - DISCREPÂNCIAS DAS COORDENADAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO ALEATÓRIOS DO MAPA DE ATUALIZAÇÃO RETIFICADO COM A TRANSFORMAÇÃO APM



Analisando-se a distribuição das discrepâncias planimétricas, verifica-se a existência de um erro sistemático no conjunto, pois a distribuição não ocorre em todos os quadrantes, concentrando-se no quadrante SE, NE e NO.

Desta forma, para verificar se a qualidade da atualização empregando o processo de monorrestituição de imagem IKONOS com o modelo APM, com altimetria proveniente de curvas de nível com equidistância de 1m e 9 pontos de apoio, pertence a classe A, formulou-se a seguinte hipótese:

$$H_0: \mu \leq 12,5;$$

$$H_1: \mu > 12,5;$$

O valor de t calculado foi de -22,2900. O valor encontrado na tabela para um nível de significância de 10% e grau de liberdade de 14 foi de 1,345. Comparando o valor calculado com o valor tabelado têm-se: $-22,2900 < 1,345$. Portanto, a hipótese H_0 foi aceita para um nível de confiança de 90%. A atualização cartográfica empregando

monorrestituição de imagem IKONOS com o modelo APM, com altimetria proveniente de curvas de nível com equidistância de 1m e 9 pontos de apoio pertence a classe A, no quesito acurácia.

Para avaliar a precisão da atualização cartográfica, empregando o sistema de monorrestituição de de imagem IKONOS com o modelo APM, com altimetria proveniente de curvas de nível com equidistância de 1m e 9 pontos de apoio, realizou-se o teste de hipótese onde $H_0: \sigma^2 \leq \text{erro padrão (elevado ao quadrado)}$ das diversas classes e a hipótese $H_1: \sigma^2 > \text{erro padrão (elevado ao quadrado)}$ das classes (A,B,C).

Neste teste usou-se a equação 4.4 que emprega a variância que se relaciona com a distribuição Qui Quadrado (χ^2).

Formulando a hipótese para a precisão na classe A têm-se:

$$H_0: \sigma^2 \leq 3,3m;$$

$$H_1: \sigma^2 > 3,3m;$$

$$\alpha = 0,1$$

$$\chi^2_{\alpha} = 21,06 \text{ (tabelado)}$$

O valor encontrado para a estatística amostral calculada foi de 0,6549. Fazendo-se a comparação $\chi^2 = 0,6549 < \chi^2_{\alpha} = 21,06$ verifica-se que a hipótese H_0 foi aceita, para um de significância de 10%, portanto a precisão planimétrica da atualização cartográfica se encontra na classe A.

Concluindo pode-se afirmar que a atualização cartográfica empregando monorrestituição de imagem IKONOS com o modelo APM, com altimetria proveniente de curvas de nível com equidistância de 1m e 9 pontos de apoio, possui classe A.

Para se avaliar a influência do número de pontos de apoio sobre a qualidade dos pontos de verificação aleatórios das feições cartográficas, foram coletadas as coordenadas dos pontos de verificação do mapa de atualização retificados com parâmetros determinados pelo ajustamento com 18 pontos de apoio, técnica dos mínimos quadrados, método paramétrico com injunção de posição e informações altimétricas provenientes de curvas de nível com equidistância de 1m. As

discrepâncias entre as coordenadas da carta na escala de 1:2000 e as coordenadas coletadas são apresentadas na tabela 44.

TABELA 44 - RESÍDUOS DAS COORDENADAS DOS PONTOS ALEATÓRIOS DO MAPA DE ATUALIZAÇÃO RETIFICADO COM A TRANSFORMAÇÃO APM

Resíduos da transformação APM nos pontos aleatórios			
Pontos	ΔE (m)	ΔN (m)	ΔR (m)
1	3,568	4,186	5,501
2	-1,341	0,493	1,428
3	0,760	0,250	0,800
4	-4,469	-1,018	4,584
5	3,240	-1,800	3,706
6	0,747	0,247	0,786
7	1,629	-2,922	3,345
8	-3,900	5,140	6,452
9	3,877	0,123	3,879
10	0,340	4,122	4,136
11	3,970	1,830	4,371
12	-1,180	4,700	4,846
13	-3,096	1,464	3,425
14	0,490	0,190	0,526
15	-0,185	-0,375	0,418
Média	0,297	1,109	3,214
Média absoluta	2,186	1,924	3,214
Desvio padrão	1,569	1,820	1,948

Observando a tabela 44 verifica-se que a média e o desvio padrão das discrepâncias resultantes são inferiores aos valores determinados para o PEC (12,5m) e para o erro padrão (7,5m), apresentados na tabela 8.

Desta forma, para verificar se a qualidade da atualização empregando o processo de monorrestituição de imagem IKONOS com o modelo APM, com altimetria proveniente de curvas de nível com eqüidistância de 1m e 18 pontos de apoio, pertence a classe A, formulou-se a seguinte hipótese:

$$H_0: \mu \leq 12,5;$$

$$H_1: \mu > 12,5;$$

O valor de t calculado foi de -18,4598. O valor encontrado na tabela para um nível de significância de 10% e grau de liberdade de 14 foi de 1,345. Comparando o valor calculado com o valor tabelado têm-se: $-18,4598 < 1,345$. Portanto, a hipótese H_0 foi aceita para um nível de confiança de 90%. A atualização cartográfica empregando monorrestituição de imagem IKONOS com o modelo APM, com altimetria

proveniente de curvas de nível com equidistância de 1m e 18 pontos de apoio pertence a classe A, no quesito acurácia.

Para avaliar a precisão da atualização cartográfica, empregando o sistema de monorrestituição de de imagem IKONOS com o modelo APM, com altimetria proveniente de curvas de nível com equidistância de 1m e 18 pontos de apoio, realizou-se o teste de hipótese onde $H_0: \sigma^2 \leq \text{erro padrão (elevado ao quadrado)}$ das diversas classes e a hipótese $H_1: \sigma^2 > \text{erro padrão (elevado ao quadrado)}$ das classes (A,B,C).

Neste teste usou-se a equação 4.4 que emprega a variância que se relaciona com a distribuição Qui Quadrado (χ^2).

Formulando a hipótese para a precisão na classe A têm-se:

$$H_0: \sigma^2 \leq 3,3m;$$

$$H_1: \sigma^2 > 3,3m;$$

$$\alpha = 0,1$$

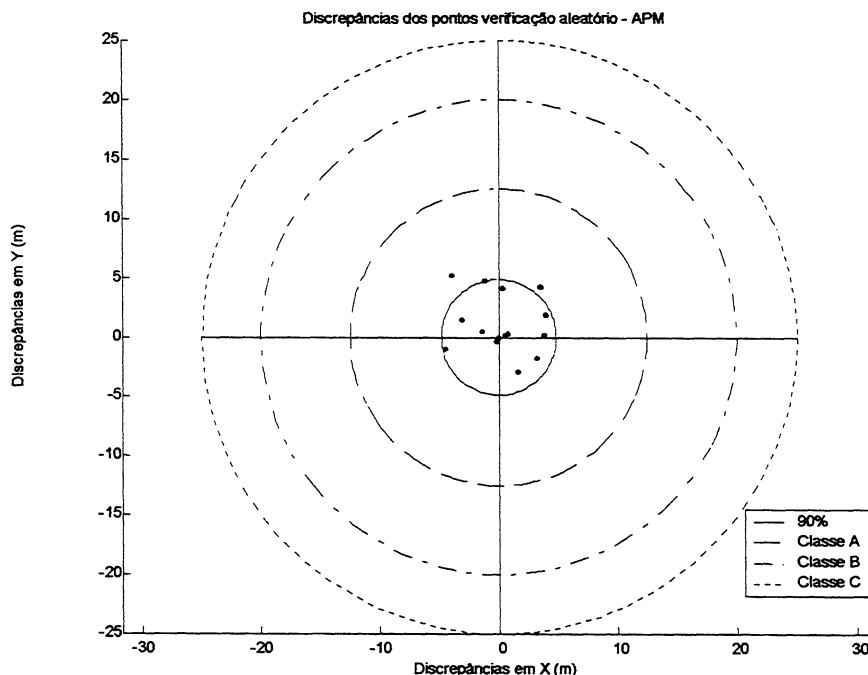
$$\chi^2_{\alpha} = 21,06 \text{ (tabelado)}$$

O valor encontrado para a estatística amostral calculada foi de 0,9448. Fazendo-se a comparação $\chi^2 = 0,9448 < \chi^2_{\alpha} = 21,06$ verifica-se que a hipótese H_0 foi aceita, para um de significância de 10%, portanto a precisão planimétrica da atualização cartográfica se encontra na classe A.

Concluindo pode-se afirmar que a atualização cartográfica empregando monorrestituição de imagem IKONOS com o modelo APM, com altimetria proveniente de curvas de nível com equidistância de 1m e 18 pontos de apoio, possui classe A.

A figura 40 representa os valores das discrepâncias dos pontos de verificação aleatórios do mapa de atualização, retificado com o modelo APM, empregando dezoito pontos de apoio no ajustamento pela técnica dos mínimos quadrados e método paramétrico com injeção de posição, dentro das diversas classes de qualidade.

FIGURA 40 - DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO ALEATÓRIOS DO MAPA DE ATUALIZAÇÃO RETIFICADO COM A TRANSFORMAÇÃO APM



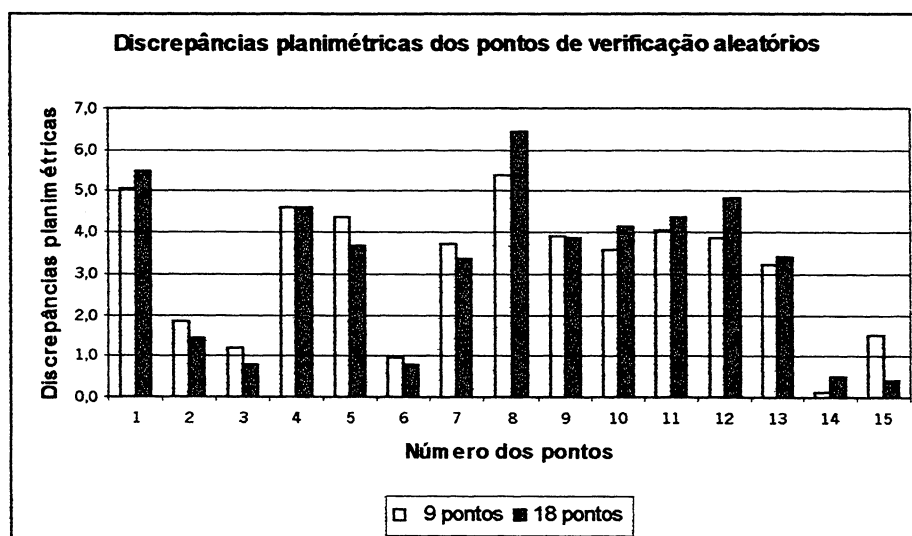
Observando-se a distribuição das discrepâncias na figura 40, verifica-se a existência de um erro sistemático no conjunto, pois a distribuição não se dá em todos os quadrantes, concentrando-se no quadrante NE, SE e NO.

Analisando-se a influência do aumento do número de pontos de apoio no ajustamento, verifica-se que houve uma redução na acurácia dos pontos de verificação aleatórios de 1,57%, pois o valor da média das discrepâncias resultantes - coluna 4 da tabela 43 - é inferior ao valor da média das discrepâncias da tabela 44. O comportamento do desvio padrão acompanhou o comportamento da média e não houve aumento na precisão dos pontos de verificação porque o desvio padrão da tabela 44 é superior ao desvio padrão das discrepâncias da tabela 43. A degeneração da precisão do mapa de atualização empregando 18 pontos de apoio foi de 20,12%.

Comparando-se os valores individuais das discrepâncias (coluna 4 das tabelas 43 e 44) nos pontos de verificação aleatórios do mapa de atualização retificado com nove e dezoito pontos de apoio, vide figura 41, observa-se que em oito pontos de

verificação houve redução no valor das suas discrepâncias. Verifica-se que a redução de discrepância ocorreu em, aproximadamente, 50% dos pontos de verificação.

FIGURA 41 – DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO ALEATÓRIOS



Diante do exposto, pode-se concluir que o aumento do número de pontos no ajustamento diminui a acurácia e a precisão do mapa de atualização. Considerou-se que o número de pontos ótimo, para a retificação dos dados vetoriais da metodologia de atualização com imagem IKONOS, com a transformação APM, técnica dos mínimos quadrados e modelo paramétrico com injunção de posição, foi de nove pontos.

Uma vez definido que para as condições anteriormente apresentadas, o número ótimo de pontos de apoio foi determinado como nove pontos, prosseguiu-se com o estudo da altimetria na metodologia de atualização cartográfica para mapas municipais, integrando imagem IKONOS e aerofotos por meio da técnica de monorrestituição digital.

A tabela 45 apresenta as discrepâncias dos pontos de verificação aleatórios do mapa de atualização, retificado com a transformação APM empregando 9 pontos de apoio no ajustamento e informações altimétricas provenientes de curvas de nível com equidistância de 10 metros.

TABELA 45 – DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICAS DAS COORDENADAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO ALEATÓRIOS - TRANSFORMAÇÃO APM

Discrepâncias da transformação APM nos pontos aleatórios			
Pontos	ΔE (m)	ΔN (m)	ΔR (m)
1	8,910	6,167	10,836
2	-3,583	-0,578	3,629
3	2,070	0,020	2,070
4	-5,149	-1,749	5,438
5	1,640	-3,370	3,748
6	1,637	0,077	1,638
7	3,344	-2,515	4,184
8	-8,950	1,580	9,088
9	8,777	2,203	9,049
10	1,550	4,082	4,367
11	5,030	2,540	5,635
12	5,450	6,780	8,699
13	0,339	2,507	2,530
14	1,870	0,790	2,030
15	-3,475	-1,335	3,723
Média	1,297	1,147	5,111
Média absoluta	4,118	2,420	5,111
Desvio Padrão	2,871	2,008	2,955

Analisando-se a tabela 45 verifica-se que: a discrepância planimétrica de 100% dos pontos de verificação são inferiores a 12,5m, os valores da média, do desvio padrão são inferiores aos valores determinados para o PEC e para o desvio padrão, presentes na tabela 8.

Desta forma, para verificar se a qualidade da atualização empregando o processo de monorrestituição de imagem IKONOS com o modelo APM, com altimetria proveniente de curvas de nível com equidistância de 10m e 9 pontos de apoio, pertence a classe A, formulou-se a seguinte hipótese:

$$H_0: \mu \leq 12,5;$$

$$H_1: \mu > 12,5;$$

O valor de t calculado foi de -9,6859. O valor encontrado na tabela para um nível de significância de 10% e grau de liberdade de 14 foi de 1,345. Comparando o valor calculado com o valor tabelado têm-se: $-9,6859 < 1,345$. Portanto, a hipótese H_0 foi aceita para um nível de confiança de 90%. A atualização cartográfica empregando monorrestituição de imagem IKONOS com o modelo APM, com altimetria proveniente de curvas de nível com equidistância de 10m e 9 pontos de apoio pertence a classe A, no quesito acurácia.

Para avaliar a precisão da atualização cartográfica, empregando o sistema de monorrestituição de de imagem IKONOS com o modelo APM, com altimetria proveniente de curvas de nível com equidistância de 10m e 9 pontos de apoio, realizou-se o teste de hipótese onde $H_0: \sigma^2 \leq \text{erro padrão (elevado ao quadrado)}$ das diversas classes e a hipótese $H_1: \sigma^2 > \text{erro padrão (elevado ao quadrado)}$ das classes (A,B,C).

Neste teste usou-se a equação 4.4 que emprega a variância que se relaciona com a distribuição Qui Quadrado (χ^2).

Formulando a hipótese para a precisão na classe A têm-se:

$$H_0: \sigma^2 \leq 3,3m;$$

$$H_1: \sigma^2 > 3,3m;$$

$$\alpha = 0,1$$

$$\chi^2_{\alpha} = 21,06 \text{ (tabelado)}$$

O valor encontrado para a estatística amostral calculada foi de 2,1727. Fazendo-se a comparação $\chi^2 = 2,1727 < \chi^2_{\alpha} = 21,06$ verifica-se que a hipótese H_0 foi aceita, para um de significância de 10%, portanto a precisão planimétrica da atualização cartográfica se encontra na classe A.

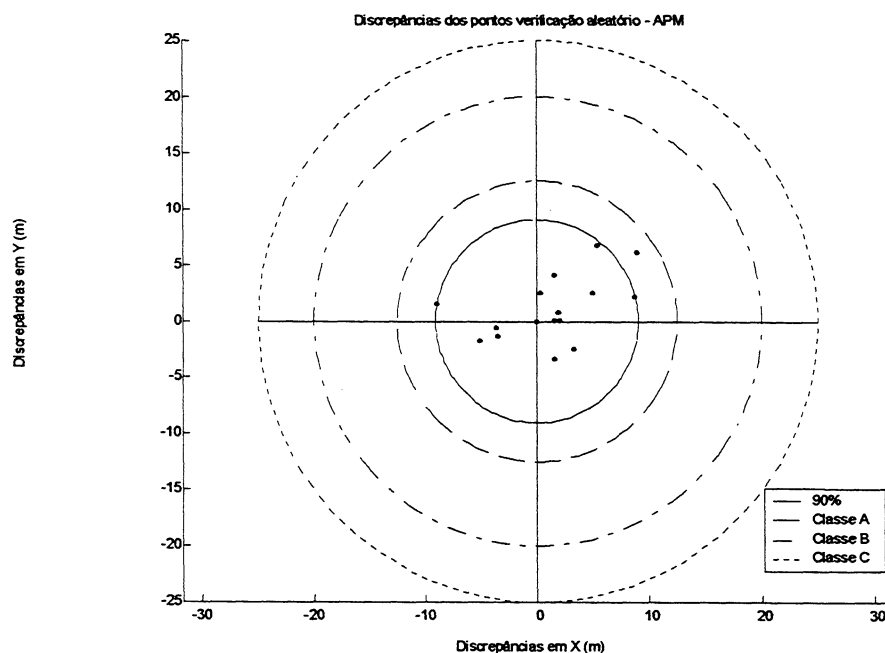
Concluindo pode-se afirmar que a atualização cartográfica empregando monorrestituição de imagem IKONOS com o modelo APM, com altimetria proveniente de curvas de nível com equidistância de 10m e 9 pontos de apoio, possui classe A.

Comparando-se os valores de média e desvio padrão, presentes nas duas tabelas 43 e 45, verifica-se que a acurácia foi reduzida em 61,54% e a precisão em 82,18%. No entanto, esta degeneração na qualidade com a aplicação de uma altimetria com menor precisão, não impede a utilização desta fonte altimétrica, com equidistância de 10m, na monorrestituição das informações vetoriais das imagens IKONOS com o modelo matemático APM.

A figura 42 representa as discrepâncias nas coordenadas planimétricas (coluna 2 e 3) dos pontos aleatórios da tabela 45 e os círculos definidores das classes

de qualidade.

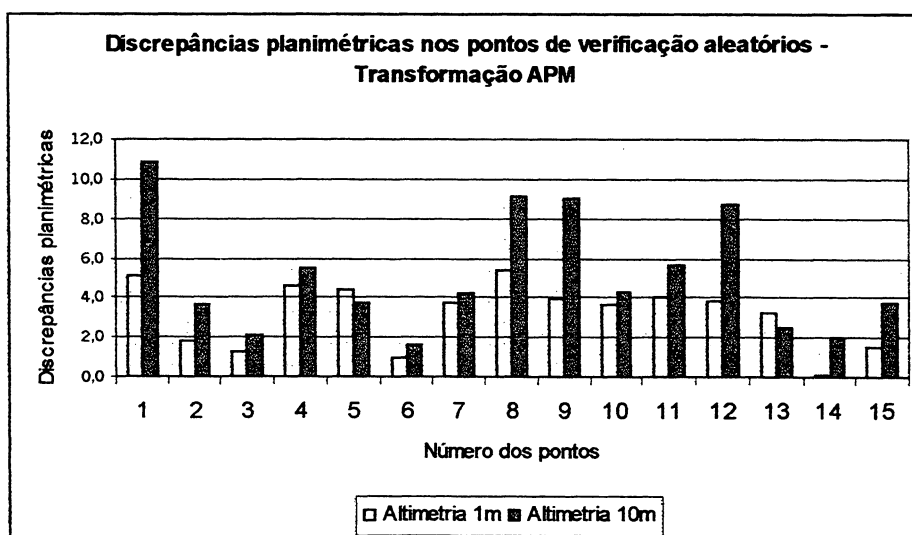
FIGURA 42 – DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO ALEATÓRIOS - TRANSFORMAÇÃO APM



Analisando-se a figura 42, verifica-se a existência de um erro sistemático no conjunto, pois há uma concentração maior de discrepâncias no quadrante NE, com maiores discrepâncias se apresentando no mesmo quadrante e onde estas estão mais dispersas.

Comparando-se as figuras 40 e 42, pode-se afirmar que o emprego de informações altimétricas mais precisas influenciou nos erros sistemáticos encontrados nos pontos de verificação aleatórios, pois ocorreu uma concentração maior das discrepâncias em um quadrante (NE).

FIGURA 43 - DISCREPÂNCIAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO ALEATÓRIOS RETIFICADOS COM EQUIDISTÂNCIA DE 1 E 10 METROS E MODELO DE TRANSFORMAÇÃO APM



Observando-se a figura 43, pode-se dizer que as grandes discrepâncias encontradas nos pontos de verificação do mapa de atualização cartográfica retificado com altimetria de 10m – pontos 1, 8, 9 e 12 – são provenientes da base cartográfica altimétrica, ou seja, são erros ou desatualizações altimétricas.

Diante do exposto, pode-se concluir que as informações altimétricas do mapa original na escala de 1:25000 com curvas de nível com equidistância de 10 metros apresentou resultado satisfatório, pois manteve a qualidade da carta original (classe A), na metodologia de atualização cartográfica integrando imagem IKONOS e aerofotos na escala de 1:30000, com a técnica de monorrestituição digital e modelo matemático APM.

4.3.4.3 Análise das discrepâncias nos pontos definidores das feições cartográficas do mapa de atualização monorestituídas da imagem IKONOS com o modelo APM

Considerando-se que a altimetria proveniente das curvas de nível com equidistância de 10m foi satisfatória para a metodologia de atualização cartográfica em

questão, prosseguiu-se com o estudo da precisão do modelo APM em diversas feições cartográficas. A metodologia de avaliação da precisão destas feições foi esquematizada conforme descritas no item 4.2.5. As análises foram realizadas sobre valores da média e desvio padrão de cada feição cartográfica, do mapa de atualização cartográfica, retificado com altimetria proveniente de curvas de isovalor, com equidistância 10m, empregando nove pontos de apoio no cálculo dos parâmetros. A tabela 46 apresenta o resumo do resultado estatístico de diferentes feições cartográficas do mapa retificado com a transformação APM, ajustada com nove pontos de apoio e informações altimétricas provenientes de curvas de nível de dez metros e a figura 44 o representa graficamente.

TABELA 46 - RESUMO DO RESULTADO ESTATÍSTICO DE DIFERENTES FEIÇÕES DO MAPA DE ATUALIZAÇÃO CARTOGRÁFICA RETIFICADO COM A TRANSFORMAÇÃO APM

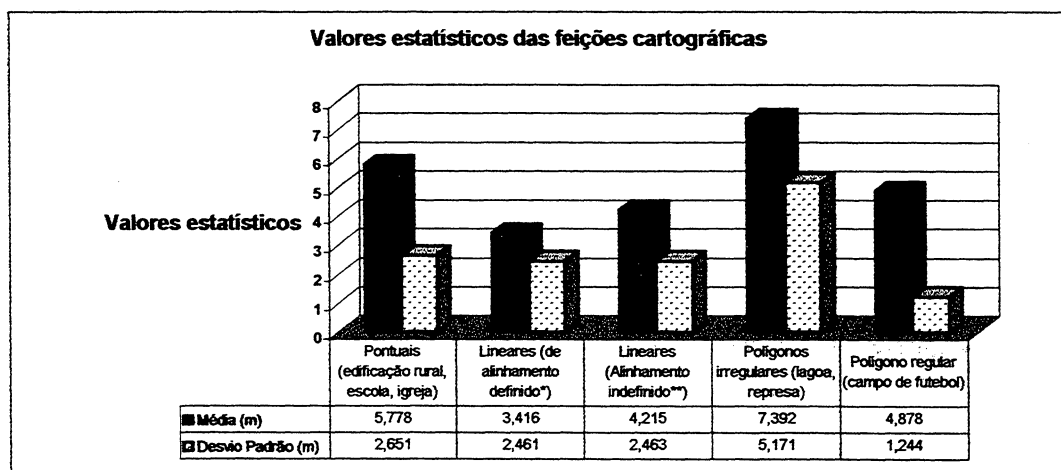
Feições cartográficas	Número de pontos	Média (m)	Desvio Padrão (m)
Pontuais (edificação rural, escola, igreja)	20	5,778	2,651
Lineares (de alinhamento definido*)	13	3,416	2,461
Lineares (Alinhamento indefinido**)	13	4,215	2,463
Polígonos irregulares (lagoa, represa)	7	7,392	5,171
Polígono regular (campo de futebol)	16	4,878	1,244

* referem-se às estradas pavimentadas e arruamentos com revestimento sólido;

** referem-se às estradas sem pavimentação, de leito natural e arruamentos sem revestimento ou com revestimento solto.

Analisando-se os valores estatísticos da média e do desvio padrão das feições cartográficas segundo suas características de representação, pode-se afirmar que o comportamento dos polígonos irregulares representativos de lagoas e represas apresentou um maior erro em relação às demais feições, devido à influência do volume de água destas feições, na época da tomada da imagem, o que acarretou modificação no traçado e conseqüentemente deslocamento nos centróides destes polígonos, considerados como referência para a avaliação dos polígonos irregulares.

FIGURA 44 - VALORES ESTATÍSTICOS DE MÉDIA E DESVIO PADRÃO DAS FEIÇÕES CARTOGRÁFICAS RETIFICADAS COM A TRANSFORMAÇÃO APM



O resultado apresentado para as informações pontuais deve-se, da mesma forma que explicado no item 4.2.5, à diferença existente entre a altitude real (edificação mais altitude do terreno) e a apresentada pelo DTM.

As feições lineares de alinhamento definido foram as que apresentaram uma menor média devido ao erro de observação na determinação das feições ser minimizado pelas formas bem definidas dos elementos.

As feições lineares de alinhamento indefinido possuem acurácia (média superior) inferior à média do alinhamento definido, por ter, muitas vezes, seu traçado influenciado pela cobertura vegetal das bordas das feições na imagem, ou mesmo por sofrerem modificações em seu traçado devido aos procedimentos de recuperação de suas vias, o que impede a determinação exata do alinhamento. No entanto, a precisão deste alinhamento ficou bem próxima à precisão do alinhamento definido porque muitas destas feições (estradas de leito natural e sem pavimentação) são representadas por seu eixo central.

A média do polígono regular ficou acima da média do alinhamento definido (vide figura 44), por aquelas possuírem discrepâncias elevadas em dois dos pontos definidores das feições. Estas discrepâncias elevadas são devidas à desatualização da fonte altimétrica, ou erro altimétrico. No entanto, o pequeno valor do desvio padrão

encontrado nas feições de polígonos regulares deve-se à forma bem definida da feição - campo de futebol - associada ao contraste radiométrico dos elementos de vizinhança, uma vez que, foram avaliados 16 pontos e somente dois destes pontos apresentaram valores muito discrepantes.

Considerando-se todas as médias e desvio padrão das discrepâncias das feições cartográficas constantes na tabela 46, pode-se afirmar que o modelo matemático APM, aplicado à metodologia de atualização cartográfica, integrando imagem de alta resolução e aerofotos na escala de 1:30000, com a técnica de monorrestituição, nas condições de ajustamento empregando nove pontos de apoio e altimetria proveniente de mapa com equidistância de 10m, conseguiu-se parametrizar as diferenças físicas entre os referenciais, imagem e terreno, dentro da acurácia e precisão determinados para a classe A, conforme tabela 8.

4.3.5 Análise da metodologia de atualização cartográfica

A metodologia de atualização cartográfica para os mapas municipais na escala de 1:25000, cujo procedimento integra ao mapa municipal, feições cartográficas adquiridas de aerofotos na escala de 1:30000 e imagens IKONOS, por meio da técnica de monorrestituição digital com os modelos matemáticos de colinearidade (foto), APM (imagem) e DLT (imagem), apresentou resultados satisfatórios quanto à precisão e à acurácia das informações provenientes das diversas fontes (vide item 4.2.4, 4.3.3 e 4.3.4). A atualização manteve o padrão de classificação da carta original – Classe A - para qualquer destes modelos anteriormente citados.

A análise de qualidade das informações do mapa original é de grande importância para uma metodologia de atualização, pois a partir desta informação pode-se determinar as fontes de dados e a metodologia a serem empregadas na atualização. Procedimentos e informações de melhor qualidade (maior precisão) exigem maiores recursos financeiros para a sua aplicação. Informações atualizadas com precisão maior do que a do mapa original é desperdício destes meios pecuniários, pois prevalece a classificação do mapa original.

Outro ponto essencial na metodologia de atualização cartográfica é a obtenção dos pontos de apoio. A qualidade destes pontos determina a qualidade das informações cartográficas do mapa de atualização, pois são a partir destes elementos que são corrigidas ou minimizadas as deformações geométricas existentes na imagem e na foto. Estes pontos podem ser adquiridos no próprio mapa original, ou em outro mapa de escala maior que o original ou mesmo por levantamento de campo.

O levantamento de campo envolve custos operacionais, tais como diárias de técnicos e combustível. Para realizar o levantamento de 12 pontos (9 pontos de apoio planimétricos e 3 altimétricos) necessários para apoiar uma foto, são precisos 2 dias úteis (foto na escala 1:30000).

A utilização do mapa original como base de dados para a obtenção do apoio pode apresentar dificuldade em fornecer detalhes fotoidentificáveis, devido às modificações ocorridas na região. No entanto, nesta área de estudo, utilizou-se outra fonte de informação, em escala maior, para a obtenção de pontos de apoio devido à baixa qualidade posicional da planimetria do mapa original deste trabalho (vide item 3.2.1).

A metodologia de atualização cartográfica desenvolvida neste estudo tem como pontos chaves as transformações entre referenciais – mapa-foto, foto-imagem, foto-mapa, imagem-mapa – e a interpretação visual das informações da imagem e da foto. Portanto esta metodologia é dependente da prática do operador. O processo de determinação das feições a serem atualizadas compara visualmente a situação antiga - existente no mapa - com a situação atual - existente na foto e na imagem - em um processo monocular de interpretação. Uma comparação minuciosa entre as fontes de informação – mapa e imagem e mapa e foto – é requerida nesta etapa. Esta metodologia de atualização cartográfica exigiu a interpretação de informações constantes na imagem e a precisão e acurácia destes novos dados dependeram muito desta capacidade de interpretar.

Uma análise prévia da área a ser atualizada, na aerofoto e na imagem IKONOS, ajuda na determinação e restituição das feições. Nesta metodologia, todas as feições

pontuais, em áreas rurais, foram digitalizadas. As edificações de mesmo padrão de construção ajudaram na identificação e restituição das escolas públicas. A seleção dos elementos pontuais mais importantes foi executada na reambulação.

Um dos maiores problemas da monorrestituição reside na identificação e restituição dos elementos hidrográficos lineares. No entanto, na metodologia de atualização cartográfica, os elementos hidrográficos, de um modo geral, sofrem pouca alteração. As maiores modificações na drenagem foram nas massas d'água – lagoas e represas – e um pequeno trecho de canalização de córrego, que por sua forma linear definida pode ser identificado e representado.

A metodologia de atualização cartográfica apresentou algumas dificuldades na identificação das feições a serem atualizadas. Estas dificuldades podem ser enumeradas em: vestígios de alinhamentos múltiplos na imagem geram incerteza sobre o traçado causando, muitas vezes, opções de escolha diferente entre operadores; diferentes interpretações sobre a localização do traçado devido aos *pixels* mistos; bifurcação não definida de estradas gerou deslocamentos na localização; áreas com mesma reflectância impediram a determinação precisa do traçado das feições; regiões arborizadas dificultam a definição precisa das feições.

Analisando-se a metodologia de atualização de aerofotos na escala de 1:30000, segundo o processo de monorrestituição de aerofotos, realizada com a orientação aproximada sem apresentar erros grosseiros, com as especificações de acurácias e precisões nas etapas de orientação interior de meio *pixel* (0,0125mm) e orientação exata de 0,3m e um DTM executado com espaçamento de 16,8m, obtidos de fonte altimétrica de amostragem secundária (vide item 2.8.1) com curvas de nível com equidistância de 10m, pode-se estabelecer que a precisão e acurácia e precisão dos pontos de verificação aleatórios são de 2,4m e 2,2m, respectivamente. A acurácia das feições cartográficas, segundo suas características de representação – pontual, polígonos regular e irregular, alinhamentos definido e indefinido – foi, respectivamente, de 5,1m, 2,7m, 7,7m, 2,4m e 4m. As precisões destas mesmas feições foram definidas pelos valores 2,2m, 1,9m, 4,8m, 1,5m e 2,3m. Estes valores de acurácia e precisão, obtidos no processo de monorrestituição de aerofotos são

compatíveis com as especificações de qualidade para um mapeamento classe A (vide tabela 8).

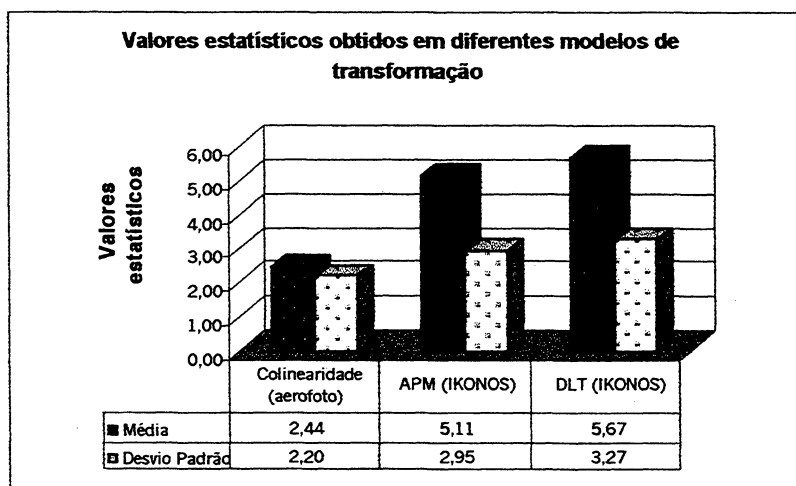
Analisando-se a metodologia de atualização cartográfica, segundo o processo de monorrestituição de imagem IKONOS, empregando a transformação APM, técnica dos mínimos quadrados e modelo paramétrico com injunção com nove pontos de apoio e um DTM executado com espaçamento de 16,8 metros obtidos de fonte altimétrica de amostragem secundária (vide item 2.8.1), com curvas de nível com eqüidistância de 10m, podem ser estabelecidos os valores de acurácia e precisão na determinação dos parâmetros de um *pixel* e meio *pixel*. Já, nestas condições apresentadas, podem ser determinados como valores para acurácia e para precisão dos pontos de verificação aleatórios em 5,1m e 3,0m. Nestes mesmos termos, podem ser estabelecidos como valores de acurácia planimétrica para os elementos pontuais - 5,8m - para os polígonos regulares e irregulares - 4,9m e 7,4m - para os elementos lineares de alinhamento definido e indefinido - 3,4m e 4,2m. Da mesma forma, podem ser estabelecidos para a precisão das feições cartográficas, pontuais o valor de 2,6m, para os polígonos regular e irregular 1,2m e 5,2m, para os elementos lineares de alinhamento definido e indefinido 2,5m e 2,5m.

Estabelecendo-se que os valores da média e desvio padrão determinam a acurácia e a precisão dos estudos envolvidos, pode-se dizer que a monorrestituição de aerofotos na escala de 1:30000 apresentou maior acurácia e precisão do que a monorrestituição da imagem IKONOS com os modelos DLT e APM, visto que os valores da média e desvio padrão da tabela 21 são menores do que os valores apresentados nas tabelas 37 e 45, nas condições definidas anteriormente. Esta comprovação da superioridade da precisão e da acurácia da monorrestituição de aerofotos sobre a monorrestituição da imagem IKONOS justifica a prioridade da restituição dos elementos da restituídos da aerofoto sobre os elementos restituídos da imagem IKONOS, definidos na metodologia de atualização cartográfica para mapa municipais integrando imagens de alta resolução IKONOS e aerofotos na escala de 1:30000 com a técnica de monorrestituição digital.

Da mesma forma, estabelecendo-se que os valores da média e desvio padrão determinam a acurácia e a precisão dos estudos envolvidos, pode-se afirmar que a

análise dos modelos de matemáticos de correção das deformações geométricas da imagem definiu que o modelo APM apresentou melhor acurácia e precisão nos pontos de verificação aleatórios do que o modelo DLT. No entanto, a diferença entre estes modelos APM e DLT não é significativa, pois a diferença entre os modelos em acurácia e precisão são de 10,96% e 10,84% nos pontos de verificação aleatórios, vide figura 45.

FIGURA 45 - VALORES ESTATÍSTICOS DE MÉDIA E DESVIO PADRÃO DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO ALEATÓRIOS



Comparando-se os valores do desvio padrão das diferentes feições cartográficas nos diversos modelos matemáticos de retificação da imagem (DLT e APM) com o modelo de retificação da foto - monorrestituição digital – representados na figura 46, verifica-se que o modelo APM apresentou menor média e variação em torno da média em quase todas as feições cartográficas, vide figura 46 e 47.

Analisando-se os valores das médias das discrepâncias das feições cartográficas presentes na figura 46, pode-se estabelecer que o processo de monorrestituição de aerofotos apresenta maior acurácia na retificação das feições cartográficas.

Considerando-se a discussão sobre os modelos da correção da imagem e verificando-se que em todas as situações - variação do número de pontos de apoio e das fontes altimétricas - o modelo APM apresentou maior precisão e acurácia do que o modelo DLT, a metodologia de atualização empregada nesta pesquisa, utilizou para a

retificação das feições cartográficas, o modelo APM, ajustado com 9 pontos de apoio e altimetria proveniente de curvas de nível com equidistância de 10m.

FIGURA 46 - VALORES DOS DESVIO PADRÃO DAS FEIÇÕES CARTOGRÁFICAS NOS MODELOS MATEMÁTICOS DE RETIFICAÇÃO DA IMAGEM DLT E APM E AEROFOTO

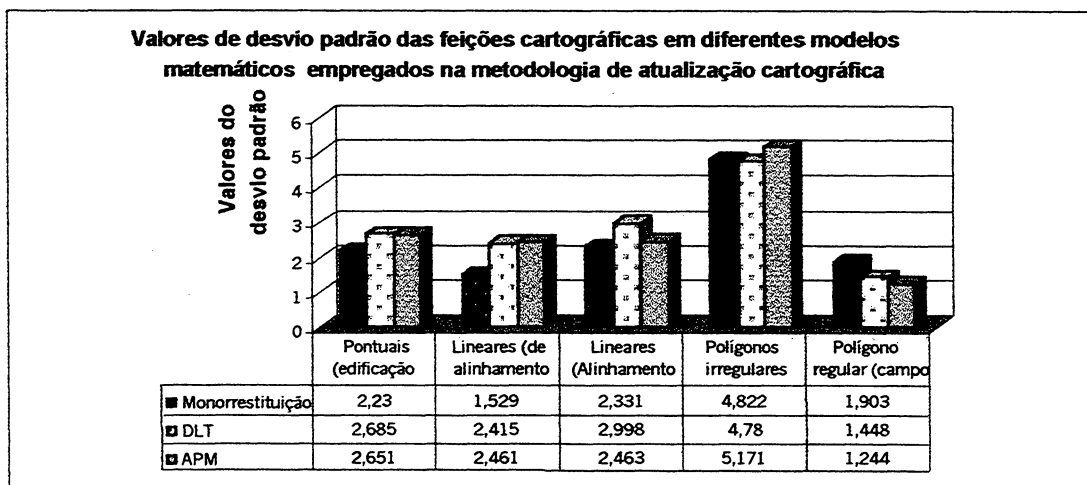
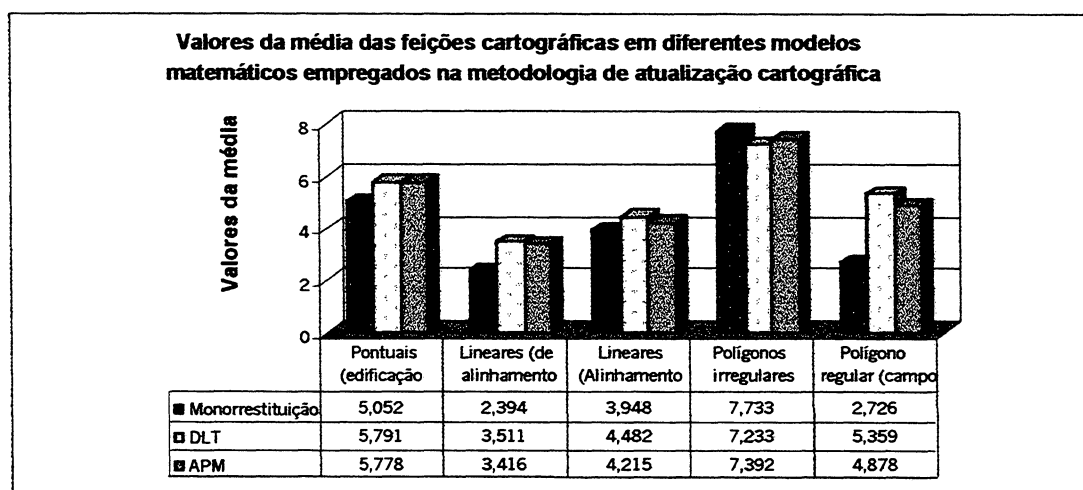
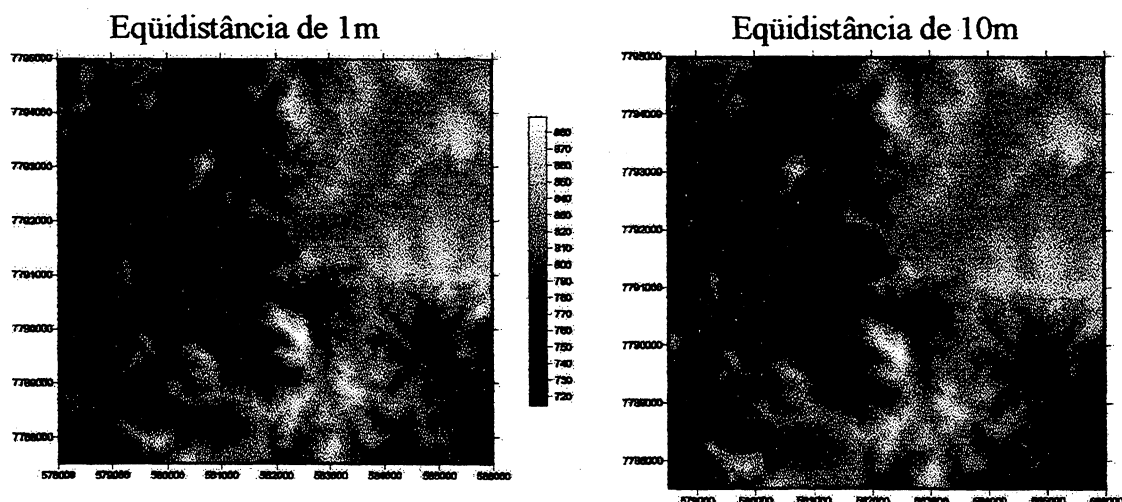


FIGURA 47 - VALORES DAS MÉDIAS DAS FEIÇÕES CARTOGRÁFICAS NOS MODELOS MATEMÁTICOS DE RETIFICAÇÃO DA IMAGEM DLT E APM E AEROFOTO



Analisando-se a metodologia quanto à altimetria empregada pode-se dizer que a função de interpolação – inverso da distância de uma potência - empregada no DTM, conseguiu interpolar de maneira satisfatória as informações altimétricas provenientes das representações gráficas tridimensionais – curvas de nível – com equidistâncias de 1m e 10m. A figura 48 apresenta as informações interpoladas das grades altimétricas em forma de imagem.

FIGURA 48 - IMAGEM GERADAS COM AS GRADES ALTIMÉTRICAS PROVENIENTES DE CURVAS DE NÍVEL COM EQUIDISTÂNCIA DE 1M E 10M



Integrando-se os dados de todas as fontes de informação atualizadas, seguiu-se, nesta metodologia, a realização da reambulação. Entretanto, houve excesso de informação no mapa de atualização, porque o mapa municipal contém somente os principais equipamentos urbanos e rurais (edificações), algumas feições foram eliminadas na reambulação. O procedimento de reambulação permaneceu inalterado com relação ao reconhecimento e coleta de informações nominais ou nomenclatura dos dados da atualização.

No processo de edição foram realizadas rigorosa revisão, correção dos elementos e finalização das informações marginais. Os dados de legenda foram selecionados das informações existentes no mapa. Nesta etapa, entretanto, não foram encontradas grandes diferenças entre as informações de fontes diferentes. As ligações de arestas ocorreram pela média das diferenças encontradas nas feições.

5.0 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Considerando-se o que foi apresentado nesta pesquisa, pode-se concluir que:

Esta pesquisa atendeu ao objetivo geral de investigar e desenvolver uma metodologia para a atualização dos mapas municipais digitais, na escala de 1:25000, integrando imagem de alta resolução – IKONOS e fotografias aéreas, na escala de 1:30000 e a técnica de monorrestituição.

Nesta pesquisa, a transformação APM foi o modelo matemático de correção geométrica da imagem IKONOS que apresentou resultado satisfatório na metodologia de atualização cartográfica, nas seguintes condições: nove pontos de apoio empregados no ajustamento por mínimos quadrados e técnica paramétrica com injeção de posição, informações altimétricas provenientes de fontes de amostragem secundária e de curvas de nível com equidistância de 10m e com espaçamento igual a 16,8m.

É possível integrar informações de aerofotos com informações de satélites de alta resolução, sem haver depreciação da qualidade dos dados da atualização, quanto à sua acurácia e à sua precisão, pois os modelos matemáticos APM e DLT, empregados na correção geométrica da imagem de satélite, apresentaram discrepâncias próximas as obtidas pela monorrestituição das aerofotos na escala de 1:30000.

A metodologia de atualização cartográfica, integrando imagens de alta resolução - IKONOS - e fotos aéreas, para mapeamentos municipais na escala de 1:25000, por meio da técnica de monorrestituição digital, se apresentou satisfatória, quanto à precisão, pois a análise das médias e dos desvios padrão das discrepâncias das informações atualizadas, restituídas das aerofotos e da imagem IKONOS determinou a classificação no padrão A de qualidade.

Analisando-se esta metodologia de atualização cartográfica, quanto aos custos envolvidos, pode-se dizer que: ela requer um ambiente computacional mais simples, sem grande capacidade de processamento e armazenamento, por tratar com informações vetoriais; ela envolve programas de CAD, gerenciador de imagem e um

programa de tecnologia nacional de baixo custo, se comparado aos programas estereofotogramétricos; ela aproveita as informações já existentes (fotografias aéreas), informações altimétricas e planimétricas da original ou de outras fontes gráficas de escala maior; ela não requer operadores especializados e com acuidade visual – restituidores. A metodologia de atualização cartográfica desenvolvida nesta pesquisa emprega a transformação entre referenciais, imagem-objeto e objeto-imagem em muitas das suas etapas, portanto a capacidade do SMD em realizar estas transformações entre os referenciais sobre as informações vetoriais é essencial nesta metodologia. Vários modelos matemáticos em 2D e 3D estão disponíveis para isso, permitindo atender a uma grande gama de aplicações.

Os modelos matemáticos, modelos afim e projetivo, não conseguiram corrigir as deformações geométricas da imagem IKONOS, dentro da precisão e acurácia necessários para realizar o trabalho de atualização cartográfica na escala de 1:25000 segundo os valores determinados pelo Decreto 89817, para a classe A.

Os modelos de transformação no espaço, APM e DLT reduziram significativamente as deformações geométricas da imagem, dentro da precisão requerida para a classe A, pelo referido Decreto, na metodologia de atualização cartográfica na escala de 1:25000.

O modelo APM apresentou menores discrepâncias nos pontos de verificação aleatórios do mapa de atualização e, portanto, maior precisão e acurácia do que o modelo DLT, nas condições apresentadas nesta pesquisa.

A função matemática empregada no DTM – inverso da distância de uma potência - conseguiu modelar o relevo de forma similar com informações altimétricas de fontes diferentes (1m e 10m).

A redução das discrepâncias das informações cartográficas retificadas empregando fontes altimétricas com diferentes acurácias não foi proporcional ao aumento na qualidade altimétrica.

O aumento do número de pontos de apoio não reduziu as discrepâncias de todos os pontos da área de estudo. A ocorrência foi localizada, privilegiando uma

região em detrimento de outra.

Apesar de se trabalhar com uma imagem de satélite, a altura da edificação influenciou na posição planimétrica dos pontos.

A aplicação de uma altimetria com maior precisão no DTM (com equidistância de 1m) não reduziu significativamente os erros encontrados nas edificações representadas de forma pontual, pois não considera a altura do objeto.

A metodologia apresentou dificuldade para traçar elementos hidrográficos naturais – rios, ribeirões e córregos, devido à visualização monoscópica da imagem.

A imagem IKONOS PSM de cor natural pôde ser fotointerpretada intuitivamente pelo operador, devido à semelhança com as informações visuais encontradas em fotografias aéreas coloridas.

A precisão de uma observação fotogramétrica (aerofoto e imagem) nesta metodologia de atualização cartográfica dependeu da resolução da placa de vídeo/placa gráfica existente no computador e da resolução da imagem digital.

As recomendações do presente trabalho são as seguintes:

Considerando-se que o modelo matemático APM apresentou um melhor resultado nesta pesquisa, recomenda-se a sua utilização na retificação das feições cartográficas da metodologia de atualização cartográfica nas condições apresentadas neste trabalho;

Dever-se-á procurar a melhor configuração de vídeo e placa gráfica disponível no computador, para melhorar a visualização dos detalhes fotogramétricos na imagem digital e aumentar a precisão nas observações fotogramétricas;

Dever-se-á avaliar, *a priori*, a precisão das informações disponíveis necessárias ao desenvolvimento da metodologia de atualização cartográfica de mapas municipais na escala de 1:25000 integrando imagem de alta resolução – IKONOS – e aerofotos na escala de 1:30000 e técnica de monorestituição digital.

Dever-se-á restringir a validade das conclusões apresentadas para procedimentos que utilizam grade altimétrica com espaçamento de 16,8m, provenientes de curvas de nível com equidistância de 10m e número de pontos de

apoio empregados no ajustamento igual a 9 pontos e uma imagem de 7092×7092 pixels.

Dever-se-á pesquisar a aplicação desta metodologia em imagem de satélite com menor ângulo de elevação nominal.

Dever-se-á pesquisar a aplicação desta metodologia associada a uma metodologia de extração semi-automática de imagem.

Dever-se-á pesquisar a aplicação desta metodologia com outras imagens de satélite de alta resolução do tipo QUICK-BIRD.

Dever-se-á pesquisar a aplicação desta metodologia com variados conjuntos de controle e outros modelos matemáticos, como por exemplo o modelo de funções racionais.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ABDEL-AZIZ, Y. I.; KARARA, H. M. Direct Linear transform from comparator coordinates into object space coordinates in close-range photogrammetry, **Proceeding of the AUI/UI Symposium on Close Range Photogrametry**, Urbana, 1-18, 1971.

ALCÁZAR, G. V. **Aplicaciones de las imagenes de satélite a la cartografia topográfica** In: ___, VII curso de sistemas de informação geográfica, teledetección y cartografia, Alcalá, Universidade de Alcalá, 1996, p.4, 16p.

ALVES, D. **Sistemas de Informação Geográficas**. In: Geoprocessamento. São Paulo: EDUSP, 1990.

AMORIM A. et al. Detecção semi-automática de alterações usando stereo-pares híbridos, In: In: XIX Congresso brasileiro de cartografia. **Anais**. Porto Alegre: SBC, 2001. outra mídia. 2001

ANDRADE, J. B. de. Fototriangulação. In: ___. **Fotogrametria**. 1. ed. Curitiba: SBEE, 1998. 258p. p.105-158.

ANDRADE, J. B. **Otimização do projeto de densificação do controle aerofotogramétrico**. In: IX CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA. 1979. **Anais...** Curitiba: SBC, 1979, p.01-17.

ANDRADE, J. B.; OLIVAS, M. A. A. **Calibração de câmaras aerofotogramétricas**. **Boletim da UFPR, Curso de Pós_Graduação em Ciências Geodésicas**, 1981, Curitiba, n. 26, p.01-39.

BAETA, A. M. M. **Avaliação da acurácia do mapeamento digital de classes de declividade, confrontado ao mapeamento analógico e aos dados da verdade do terreno: estudo da Carta de Igarapé (MG) utilizando o programa Spring/ INPE**. Belo Horizonte, 1999. 172p. Dissertação (Mestrado em Tratamento da Informação Espacial). Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais.

BRASIL. Decreto nº 89 817, de 20 de junho de 1984. Estabelece as Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, n.120, p. 8884-8886, 22 jun. 1984.

BRASIL. Ministério do Exército. **Manual Técnico Serviço Geográfico – T 34-703**. Reambulação. Brasília: Centro Gráfico Senado Federal, 1975.

BRUM, A. G. V. de. **O uso da câmara imageadora a bordo de satélites para determinação de atitude: simulação computacional**. São José dos Campos, 1999. 113p. Tese (Engenharia e Teconologia Espacial) Mecânica Espacial, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

CAMPOS, I. de O. **Análise para o estabelecimento de modelos digitais de terreno - DTM**. São Carlos, 1994. 85p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes). Departamento de Transportes. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo.

CARNASCIALI, A. M.;BUENO, D. M. Integração de imagens matriciais e vetoriais. IN:GISBRASIL 96, 1996, Curitiba, Anais...Paraná: Fator Gis. 1996. 971p., p.950-956..

CARVALHO, L. D.. **Análise das técnicas GPS para os posicionamentos estáticos e cinemáticos em bases curtas**. Curitiba. 1999. 139p. Tese (Mestrado em Ciências Geodésicas). Departamento de Geomática. Universidade Federal do Paraná.

CRUZEIRO - TERRAFOTO - PROSPEC. Betim. 1977. 1 mapa: positivo conjugado; 60 x 83. Escala 1:25.000.

DALMOLIN, Q. **Inclusão de novas observações, injunções e generalização do modelo**. In:____, Ajustamento por mínimos quadrados. Curitiba, Imprensa Universitária –UFPR, 2002. 175p. 145-166p.

DAL POZ, A. P. Monorestituição aplicada à atualização cartográfica. In: XVI CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA, 1993. **Anais Vol 2**, Rio de Janeiro: SBC, 1993, p.410-417.

FERREIRA, L. F. et al. Digitalização de folhas em borda de fuso UTM. In: 1º Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário. **Anais...** Florianópolis. 1994 p.49-58.

FILLIBEN, J. J. The Reprobability Plot Correlation Coefficient Test for Normality **Tecnometrics**, Washington, v.17, p.111-117, 1975.

FRASER, C. S., et al. **Processing of IKONOS imagery form submetre 3D positioning and building extraction**. ISPRS Journal of Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Falls Church. 56. p.177-194. 2002.

FREITAS et al. **Las potencialidades de las imagenes del IKONOS para a actualización cartográfica em escalas grandes**. Disponível em: http://www.asovig.org/documentos/Freitas%20M_Cintra%20%J_Potencialidades.pdf. Acesso em: 20 junho. 2003.

GEMAEL, C., **Método Combinado com injunções**. In ____, Introdução ao ajustamento de observações: aplicações geodésicas. Curitiba, Editora UFPR, 1994. 319p. p.185-190.

GERLACH, F.. Characteristics of Space Imaging's One-Meter Resolution Satellite Imagery Products. In: CONGRESS OF THE INTERNATIONAL SOCIETY FOR PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING. XIX th., 2000., **Anais XXXIII**, Part.B1. Amsterdam.: ISPRS, 2000. 1070p. 128-135p.

GALLO, M., CAMARGO, P. O. Utilização do GPS no controle de qualidade Cartas. IN: I Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário. **Anais...**, Florianópolis, p.41-48, 1994.

GOLDEN SOFTWARE, INC.. **SURFER User's guide: Contouring and 3D Surface Mapping for Scientists and Enginners**. Versão 7. U.S.A. 1999. p.619.

GUIMARÃES FILHO, H., CRÓSTA, A. P.. **Digitalização de Mapas: um roteiro.** Fator GIS, Curitiba, n.4, p.35-39, Jan/Mar. 1994.

HATTORI, S. et. al.. Orientation of high-resolution satellite images based on affine projection. In: CONGRESS OF THE INTERNATIONAL SOCIETY FOR PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING. XIX th., 2000. , **Anais XXXIII**, Part.B3. Amsterdam.: ISPRS, 2000. 1070p. 359-366p.

IKONOSII. Meio digital. Curitiba: Tese Engenharia, 2000. Imagem de Satélite. Modo PSN.

JENSEN, J. R.. **Introdution to Digital Image Processing of Remotely Sensed Data.** In: __, Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective. 2. ed. Saddle River. NJ: Prentice Hall, 1996. 316p. p.1-16.

KEATES, J. S.. **Cartographic Design and Production** 2.ed. Essx:Longman Scientific & Technical. 1989.

KODAK, Eastman Company. **Remote Sensing camera aboard IKONOS produces stunning black-and-white and color images.** Disponível em: <http://www.kodak.com.country/us/en/corp/pressreleases/r19991105-03.shtml> Acesso em: 18 mar. 2001.

LEAL, E. da M.. **Análise da qualidade posicional em bases cartográficas geradas em CAD.** Curitiba. 1998. 127p. Tese (Mestrado em Ciências Geodésicas). Departamento de Geomática. Universidade Federal do Paraná.

LI, R.; et al. **Accuracy Evaluation of Ground Points from IKONOS High-Resolution Satellite Imagery.** Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Maryland, v.66, n. 9, p.1103-1112, 2000.

LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W.. **Photogrammetry.** In: __, Remote Sensing and Image Interpretation. 3. ed. U.S.A: John Wiley & Sons, Inc., 1994. 750p. p.295-351

LUGNANI, J. B.. **Aprimoramentos para atualização cartográfica**. Curitiba, 1985. 84p. Tese (Professor Titular em Geociências). Departamento de Geociências. Universidade Federal do Paraná.

LUGNANI, J. B.. **Introdução à fototriangulação**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná. 1987. 134p..

MAKAROVICK, B.. **Digital Mono-ploters**. I.T.C Journal, Vol. 1 p. 101-122, 1973.

MASRY, S. E. **Digital mapping using entities: New concept**. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 45(2) p.193-200, 1979.

MCGRATH, G. ;JOHNSON, A. Municipalities and the maintenance of maps and databases. In: Proceedings of the Symposium Mapping and Geographic Information Systems , 30., 1994. Athens. **Anais..** volume 30. part 4. Georgia. : ISPRS, 1994. 704p. p.273-280.

MERCHANT, D. C.. **Analytical Photogrammetry: Teory and Practice**, part I. Columbus, Ohio, 1979, Department of Geodetic Science, The Ohio State University.

MINAS GERAIS. Instituto de Geociências Aplicadas e Assembléia Legislativa do Estado de Minas Gerais. **As denominações urbanas de Minas Gerais: cidades vilas mineiras com estudo toponímico e da categoria administrativa**. Assembléia Administrativa do Estado de Minas Gerais, 1997, 230p.

MITISHITA, E. A.. **Deteção de erros grosseiros nas aerotriangulações**. Curitiba, 1986. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

MITISHITA, E. A. **Monorrestituição digital de aerofotos, associada com sistemas de computação gráfica C.A. D., para fins de mapeamento na área florestal**. Curitiba, 1997. 250p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) Universidade Federal do Paraná.

MITISHITA, E.A. **Sistema Monorestituidor Digital**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA, XIX, 1999, Olinda. Anais CIV 25/99. Recife.: SBC, 1999. CD-ROM.

NOVAC, K. **Analytical Photogrammetry**. Departament of Geodesic Science and Surveying. GS 628. 1991. 134p..

ONO, T. et al. Digital Mapping using high resolution satellite imagery base don 2d affine projection model. In: CONGRESS OF THE INTERNATIONAL SOCIETY FOR PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING. XIX th., 2000. , Anais XXXIII, Part.B3. Amsterdam.: ISPRS, 2000. 1070p. 672-677p.

PINTO, S. dos A. F. Princípios físicos do sensoriamento remoto. In:____, **Sensoriamento Remoto I**. Belo Horizonte: PUC MG , 1998. 105p. p.5-30.

PLAMBEL. (Minas Gerais). **Projeto Região Metropolitana**: foto aérea. Escala: 1:30.000. Minas Gerais, Fx.1924M. n° 0875 1989.

PORTUGAL, J. L.; et. al.. Modelo Digital de Terreno - **Cartografia e Cadastro**. n°10 1999. p.23- 31.

REAGAN, A. M.; ARMENAKIS C.. Operational aspects for digital revision of topographic maps. In: Proceedings of the Symposium MAPPING AND GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS. 1994. Anais Vol.30, Part.4. Athens.: ISPRS, 1994. 655p. 369-390p.

RIBAS, E. B.; SARAIVA, C. C. S.. Parâmetros para a utilização do GPS na reambulação de mapas municipais: viabilidade e restrições. In: GISBRASIL 97, 1997, Curitiba, Anais. Paraná: Fator Gis. 1997, outra mídia.

RICHARDS, J. A. **Error correction and registration of image data**. In: _____, Remote Sensing Digital Image Analysis: an introduction. 2.ed. Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1993. 339p. p.39-63

ROBBI, C. Atualização cartográfica. In: Iº Seminário Técnico de Cadastro e Planejamento Municipal. **Anais**. Curitiba, 1990, p.65-73.

ROSIER, F. A. **Aerotriangulação semi-analítica**: ajustamento simultâneo com injunções posicionais. Curitiba, 1983. Curso de Pós-graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná.

SANTOS, C. J. B.; et al.. **O mapa municipal digital**: Apoio à Base Territorial Rural do Censo do Ano 2000. Disponível em: <http://www.cartografia.org.br/xixcbccd/artigos/c3/ciii-33/cbc99.pdf>, Acesso em: 9 out. 2001.

SARAIVA, C. C. S.; MITISHITA, E. A. Avaliação da grade regular retangular gerada pelos métodos de Kriging e Inverso da distância de uma potência para fins de monorrestituição. In: II Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas. **Anais**. Curitiba: UFPR, 2001. outra mídia.

SPACE IMAGING - **arquivo de metadados**, 2000.

STRAUB et al. Towards the automatic interpretation of images for GIS update. In: CONGRESS OF THE INTERNATIONAL SOCIETY FOR PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING. XIX th., 2000. , **Anais XXXIII, Part.B2**. Amsterdam.: ISPRS, 2000. 649p. p.525-531.

TAO, C. V; et al. Image rectification using a generic sensor model – rational function model. In: CONGRESS OF THE INTERNATIONAL SOCIETY FOR PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING. XIX th., 2000. , **Anais XXXIII, Part.B3**. Amsterdam.: ISPRS, 2000. 1070p. 874-881p.

TAVARES. M. M.; et al. Atualização cartográfica com o uso de ortofotos digitais. In: GISBRASIL 96, 1996, Curitiba, **Anais...**Paraná: Fator Gis. 1996. 971p., p.612-618.

VERGARA, O. R. d' Alge, J. c. l.. Metodologia para a atualização de cartas topográficas com produtos de sensoriamento remoto e SIG. In: XVII Congresso Brasileiro de Cartografia. **Anais**. Rio de Janeiro: SBC.1995.

VIADANA, M. I. C. DE F.. **Atualização de cartas topográficas utilizando imagens orbitais – metodologia alternativa para microcomputador**. São Paulo, 1995. 135p. Tese (Doutorado em Engenharia). Engenharia de Transporte. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

VILLAR, A. A. **Princípios Físicos**. In: VII Curso de sistemas de informacion geográfica, teledetection y cartografia. Alcalá, Univerisidade de Alcalá, 1996 p.4. 13p.

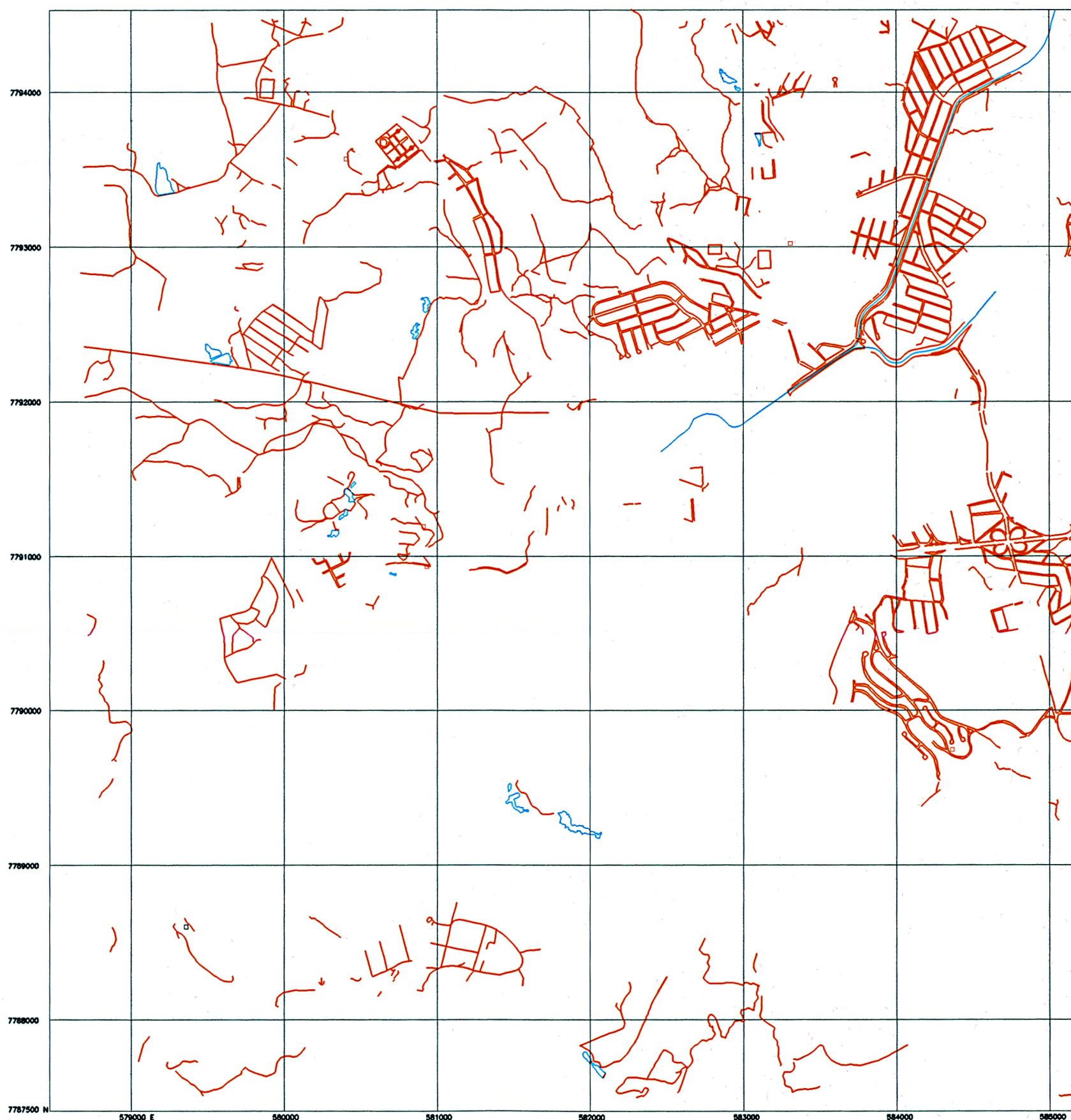
VILLAREAL, P. E. G.. **Atualização de mapas digitais com fotografias aéreas singulares**. Curitiba, 1992. 91p. Tese (Mestrado em Ciências Geodésicas). Departamento de Geodésia. Universidade Federal do Paraná.

WEIBEL R.; HELLER M.. **Digital Terrain Modelling**, In: MAGUIRI, David J. et al. Geographical Information Systems. New York: Logman Scientific Technical, 1991. 649p., p.269-296.

WOLF, P. R. **Coordinate transformations**. In: ____, Elements of photogrammetry. 2.ed. New York: McGraw-Hill, 1983. 628p. p.576-602.

ZUYLEN, L van. Map revision. **ITC Journal**, Vol. 3, p. 490-502, 1976.

APÊNDICE I - MINUTA DE ATUALIZAÇÃO DA FOTO



LOCALIDADE

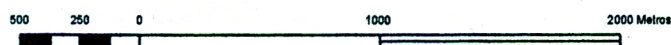
- Área Urbana
- Edificação Rural
- Escola
- Igreja

SISTEMA VIÁRIO

- Rodovia pavimentada
- Rodovia sem pavimentação
- Leito Natural
- Caminho ou trilha
- Ferrovia

HIDROGRAFIA

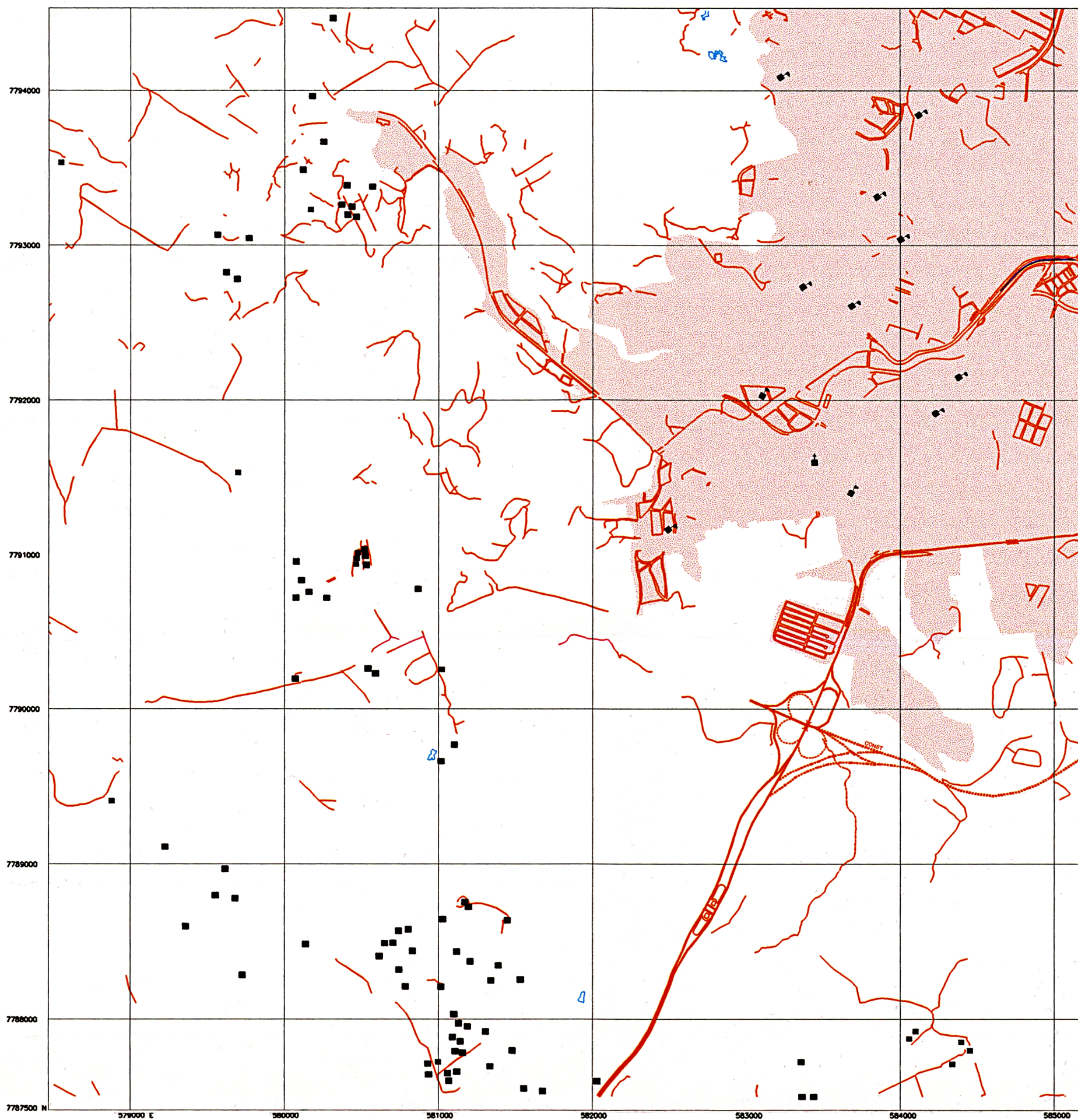
- Curso d'água permanente
- Curso d'água permanente
- Lagoa / Barragem



EQÜDISTÂNCIA DAS CURVAS DE NÍVEL : 10 METROS
 DATUM VERTICAL: IMBITUBA - SANTA CATARINA
 DATUM HORIZONTAL: CÔRREGO ALEGRE- MINAS GERAIS
 PROJEÇÃO UNIVERSAL TRANSVERSA DE MERCATOR

Documento elaborado: folhas da carta do PLAMBEL
 Superintendência de Desenvolvimento
 da Região Metropolitana
 Betim, Fecho do Funil escala 1:25.000, 1977

APÊNDICE II - MINUTA DE ATUALIZAÇÃO DA IMAGEM



LOCALIDADE

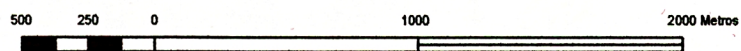
- Área Urbana
- Edificação Rural
- Escola
- Igreja

SISTEMA VIÁRIO

- Rodovia pavimentada
- Rodovia sem pavimentação
- Leito Natural
- Caminho ou trilha
- Ferrovia

HIDROGRAFIA

- Curso d'água permanente
- Curso d'água permanente
- Lagoa / Barragem



EQÜDISTÂNCIA DAS CURVAS DE NÍVEL : 10 METROS

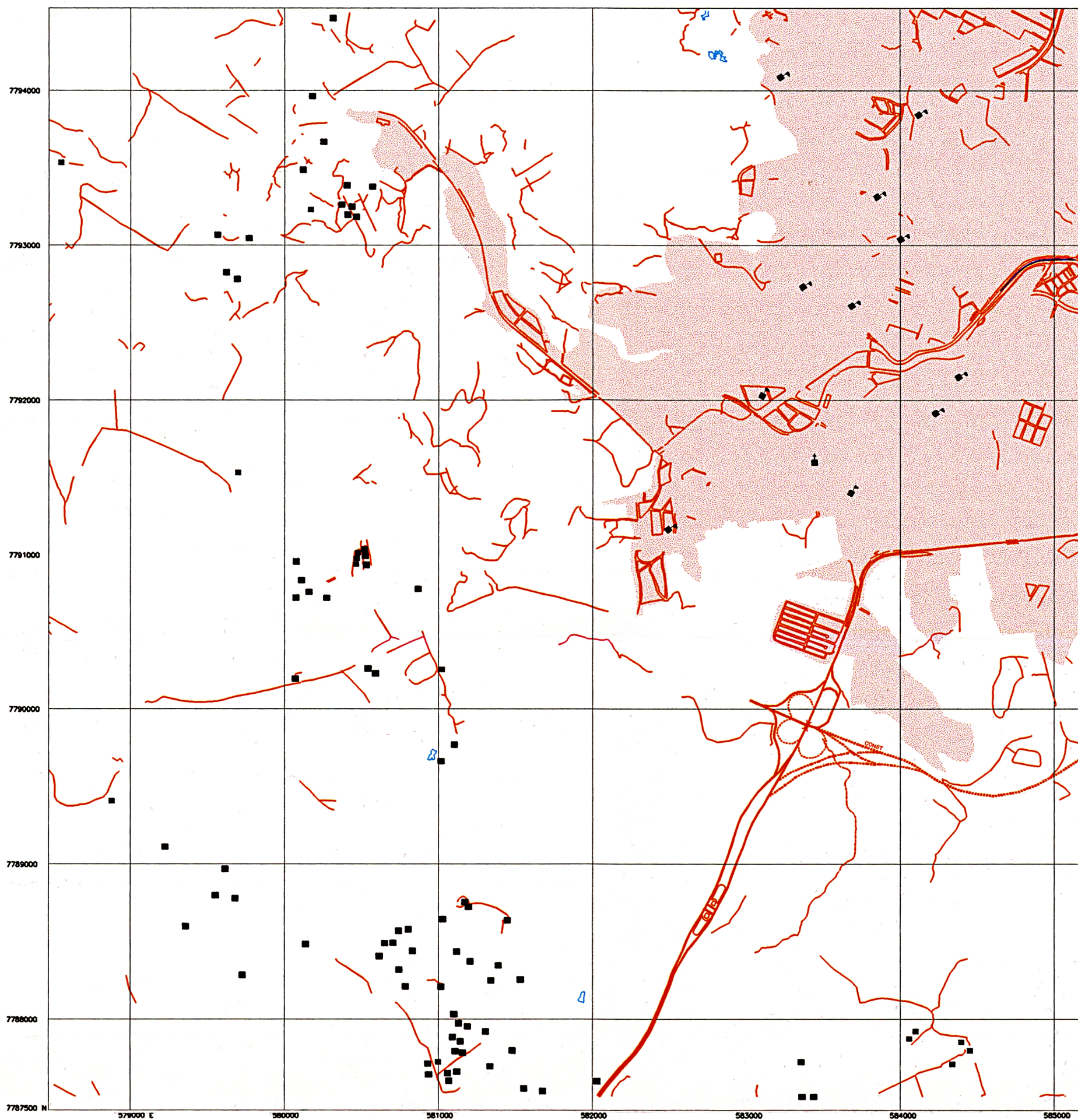
DATUM VERTICAL: IMBITUBA - SANTA CATARINA

DATUM HORIZONTAL: CÔRREGO ALEGRE- MINAS GERAIS

PROJEÇÃO UNIVERSAL TRANSVERSA DE MERCATOR

Documento elaborado: folhas da carta do PLAMBEL
Superintendência de Desenvolvimento
da Região Metropolitana
Betim, Fecho do Funil escala 1:25.000, 1977

APÊNDICE III - MAPA MUNICIPAL ATUALIZADO



LOCALIDADE

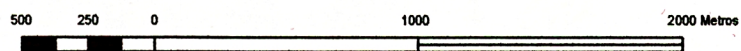
- Área Urbana
- Edificação Rural
- Escola
- Igreja

SISTEMA VIÁRIO

- Rodovia pavimentada
- Rodovia sem pavimentação
- Leito Natural
- Caminho ou trilha
- Ferrovia

HIDROGRAFIA

- Curso d'água permanente
- Curso d'água permanente
- Lagoa / Barragem



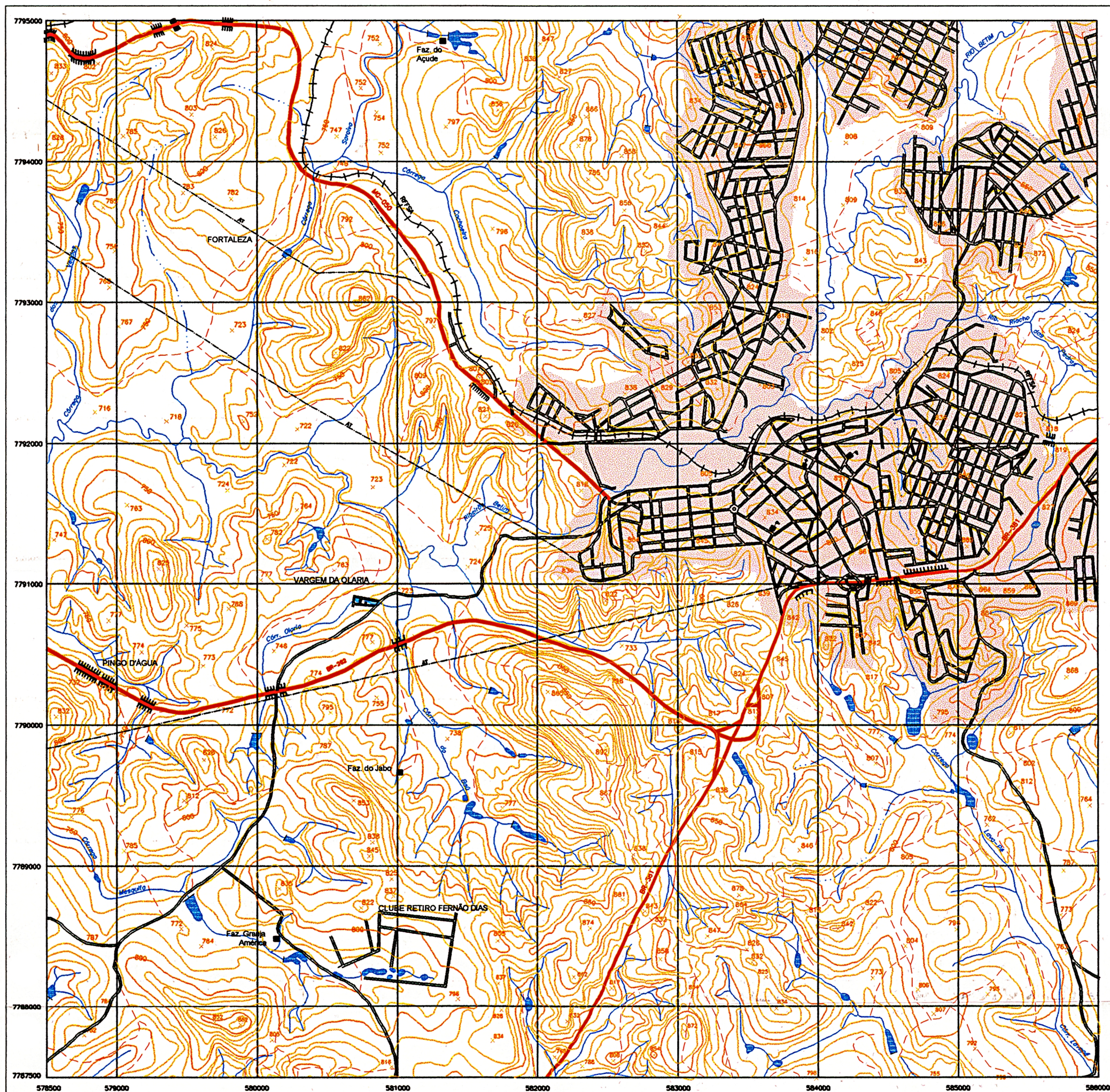
EQÜDISTÂNCIA DAS CURVAS DE NÍVEL : 10 METROS

DATUM VERTICAL: IMBITUBA - SANTA CATARINA

DATUM HORIZONTAL: CÔRREGO ALEGRE- MINAS GERAIS

PROJEÇÃO UNIVERSAL TRANSVERSA DE MERCATOR

Documento elaborado: folhas da carta do PLAMBEL
Superintendência de Desenvolvimento
da Região Metropolitana
Betim, Fecho do Funil escala 1:25.000, 1977



LOCALIDADE

- Área Urbana
- Edificação Rural
- Escola
- Igreja

HIDROGRAFIA

- Curso d'água permanente
- Curso d'água permanente
- Lagoa / Barragem

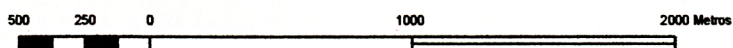
SISTEMA VIÁRIO

- Rodovia pavimentada
- Rua
- Leito Natural
- Caminho ou trilha
- Ferrovia
- Alta tensão

ALTIMETRIA

- Curva de nível mestra
- Curva de nível intermediária
- Ponto cotado

Escala 1:25.000



EQÜDISTÂNCIA DAS CURVAS DE NÍVEL : 10 METROS

DATUM VERTICAL: IMBITUBA - SANTA CATARINA
 DATUM HORIZONTAL: CÔRREGO ALEGRE - MINAS GERAIS
 PROJEÇÃO UNIVERSAL TRANSVERSA DE MERCATOR







Documento elaborado: folhas da carta do PLAMBEL
 Superintendência de Desenvolvimento
 da Região Metropolitana
 Betim, Fecho do Funil escala 1:25.000, 1977

















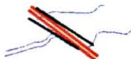



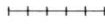
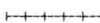
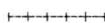
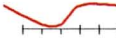
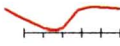

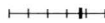


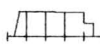

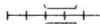









ANEXO I - MAPA MUNICIPAL DA ÁREA DE ESTUDO NA ESCALA 1:25000
MUNICÍPIO DE BETIM










































**ANEXO II - MANUAL DE CONVENÇÕES CARTOGRÁFICAS PARA MAPAS
MUNICIPAIS - IGA**













Manual de Convenções Cartográficas – IGA












- Confeção de mapas municipais em modo analógico -

ELEMENTOS CARTOGRÁFICOS					
REAMBULAÇÃO/ COMPILAÇÃO		PRODUTO FINAL			
COR	SÍMBOLO	ELEMENTO	SÍMBOLO	ESPECIFICAÇÃO (mm)	COR
Rosa escuro		Área urbana	Reticula 20%	Reticula 20%	Vermelho Claro
Preto	●	Metrópole regional	●	Colagem/normografar	Preto
Preto	●	Centro macrorregional	●	Colagem/normografar	Preto
Preto	◎	Centro macrorregional	◎	Colagem/normografar	Preto
Preto	○	Centro local	○	Colagem/normografar	Preto
Preto	(cidade)	Cidade (Sede de município)	●	Colagem/normografar	Preto
Preto	(vila)	Vila (Sede de distrito)	●	Colagem/normografar	Preto
Preto	(povoado)	Povoado	◎	Colagem/normografar	Preto
Preto	(núcleo)	Núcleo	- normografar-	- normografar-	Preto
Preto	Lugarejo	Lugarejo	- normografar-		Preto
Roxo		Lugar denominado	- normografar -		Preto
Vermelho	■	Sede de propriedade rural	■	Gabarito 252 - normografar-	Preto
Vermelho	□	Edificação rural	□	Gabarito 252 Traço 0,15 mm - normografar-	Preto
Preto	(Bairro) (Loteamento)	Loteamento ou bairro	- normografar-	- normografar-	Preto
Vermelho		Rodovia pista dupla		Traço 0,90 mm	Vermelho e Preto
Vermelho		Rodovia pavimentada		Traço 0,60 mm	Vermelho
Preto	(Em pavimentação) - rotular o trecho-	Rodovia em pavimentação		Traço 0,60 mm	Vermelho

Preto	(Em construção) -rotular o trecho-	Rodovia em construção		Traço 0,60 mm	Vermelho
Vermelho		Rodovia sem pavimentação		Traço 0,60 mm	Vermelho
Verde claro		Rodovia em leito natural		Traço 0,30 mm	Preto
Verde claro		Caminho		Traço 0,30 mm	Preto
Verde claro e vermelho		Arruamento		Verde: Traço 0,30 Vermelho: Traço 0,60	Preto e vermelho
Vermelho		Balsa ou vau		Vermelho: Traço 0,32 Mm	Vermelho
Vermelho		Direção de rodovia (rotular a cidade mais próxima)		Colagem/normografar	Vermelho
Preto		Ponte de rodovia		Gabarito 252 45°	Preto
Preto	BR – 040 MG - 262	Prefixo e número de rodovia Federal Estadual	BR – 040 MG - 262	- Normografar -	Vermelho
Vermelho		Rodovia em barragem		Traço 0,30	Preto
Vermelho		Túnel de rodovia		Gabarito 174 Traço 0,25 mm - Normografar -	Vermelho
Preto		Ferrovia em operação		Gabarito 174 Linha: Traço 0,25 Dormente: Traço 0,15	Preto
Preto		Ferrovia inativa		Gabarito 174 Linha: Traço 0,25 Dormente: Traço 0,15	Preto
Preto		Ferrovia junto à rodovia		Interromper os dormentes junto à rodovia	Preto
Preto		Estação ferroviária		Gabarito 381 - Normografar -	Preto
Preto		Direção da ferrovia (rotular a cidade mais próxima)		Colagem/normografar	Preto
Preto		Pátio ferroviário		Gabarito 174	Preto
Preto		Ponte de ferrovia		Gabarito 174	Preto
Preto		Túnel de ferrovia		Gabarito 220	Preto
Preto		Aeroporto		Colagem/normografar	Preto
Preto		Barragem		Traço 0,30 mm	Preto
Preto		Campo de pouso		Colagem/normografar	Preto

Preto		Cemitério		Gabarito 195	Preto
Preto		Coordenada geográfica		Traço 0,15 mm	Preto
Preto		Escola		Gabarito 249	Preto
Preto		Gruta ou lapa		Gabarito 252	Preto
Preto		Hospital ou casa de saúde		Colagem/normografar	Preto
Preto		Igreja		Gabarito 333	Preto
Preto		Industria		Colagem/normografar	Preto
Preto		Linha transmissora de energia elétrica (alta tensão)		Gabarito 243 Traço 0,15 mm	Preto
Preto		Linha telegráfica ou telefônica		Traço 0,15 mm	Preto
Preto		Marca terrestre		Colagem/normografar	Preto
Preto		Marco de limite		Colagem/normografar	Preto
Preto		Mina (rotular, entre parêntesis, a substância)		Colagem/normografar	Preto
Preto		Oleoduto ou gasoduto superficial 1		Traço 0,15 mm	Preto
Preto		Oleoduto ou gasoduto subterrâneo		Traço 0,15 mm	Preto
Preto		Pista de aeródromo (representar na escala)		Traço 0,15 mm	Preto
Preto		Porto ou ancoradouro		Colagem/normografar	Preto
Preto		Quadro externo do mapa, encarte, croqui de posição geográfica, mapa geológico		Traço 0,25 mm	Preto
Preto	Sem representação	Quadro externo da folha		Traço 0,40 mm	Preto
Preto		Subestação de energia hidráulica ou térmica		Colagem/normografar	Preto
Azul		Açude ou represa		Traço 0,20 mm Reticula 20%	Azul
Azul		Aqueduto superficial		Traço 0,20 mm	Azul

Azul		Aqueduto subterrâneo		Traço 0,20 mm	Azul
Azul		Cachoeira		Gabarito 381 Traço 0,20 mm	Azul
Azul		Canal		Traço 0,20 mm	Azul
Azul		Corredeira		Gabarito 381 Traço 0,80 mm	Azul
Azul		Curso d'água permanente		Traço 0,20 mm Reticula 20%	Azul
Azul		Curso d'água intermitente		Traço 0,20 mm	Azul
Azul		Curso d'água em sumidouro		Gabarito 230	Azul
Azul		Direção do curso d'água		Colagem/normografar	Azul
Azul		Lago ou lagoa permanente		Traço 0,20 mm Reticula 20%	Azul
Azul		Lago ou lagoa temporária		Traço 0,20 Reticula 20%	Azul
Azul e sépia		Lago ou lagoa seca		Traço 0,20 mm Reticula 20%	Azul
Preto		Tanque (água ou gás)		Gabarito 313	Preto
Preto		Teleférico ou correia transportadora		Traço 0,15 mm	Preto
Preto		Usina hidrelétrica ou térmica		Colagem/normografar	Preto
Laranja		Limite estadual		Traço 0,40 mm	Preto
Laranja		Limite municipal		Traço 0,40 mm	Preto
Amarelo		Limite distrital		Traço 0,40 mm	Preto
Preto		Limite de área especial		Traço 0,15 mm	Preto
Preto	(Limite indefinido)	Limite indefinido ou em litígio	- normografar-	- normografar-	Preto
Azul		Poço de água ou fonte		Gabarito 313	Azul
Azul		Terreno sujeito à inundação		Colagem	Azul
Azul		Túnel ou aqueduto		Gabarito 174	Azul

Preto	×	Altitude não comprovada		Gabarito 333 Traço 0,15 mm	Sépia
Preto		Aterro		Gabarito 288 Traço 0,15 mm	Sépia
Preto		Corte		Gabarito 288 Traço 0,15 mm	Sépia
Vermelho		Curva de nível mestra		Traço 0,25 mm	Sépia
Verde		Curva de nível intermediária		Traço 0,15 mm	Sépia
Vermelho ou verde		Depressão		Gabarito 288 Traço 0,15 mm	Sépia
Preto	△	Ponto trigonométrico	△	Traço 0,20 mm	Preto
Preto	×	Referência de nível	×	Traço 0,20 mm	Preto